

The Joined Wing

AFRL、ボーイング、および NASA – 結合翼型
SensorCraft 機の風洞テストに成功



写真クレジット：NASA

Air Force Research Laboratory (AFRL) では、無人での連続航行が可能な高高度監視飛行プラットフォーム用として将来的に転用できるテクノロジーの開発を目指し、SensorCraft 機プロジェクトを立ち上げました。この研究プロジェクトでは、大型でありながら柔軟な飛行が可能な航空機に関するテクノロジーの開発に向けて、AEI (空気力学的効率改善) プログラムを作成しました。AEI プログラムの目標は、フラッタ抑制、GLA (突風荷重軽減)、静的マージンの減少などを実証することにより、SensorCraft 機の構造重量を減少させ、機体の耐久性、飛行範囲、および積載量を増加させるテクノロジーを開発することでした。AEI プログラムでは、NASA Transonic Dynamics Tunnel (TDT) を使用して、SensorCraft 機の2つの設計に対するさまざまな風洞テストを行いました。テスト対象は、参考文献1と2にそれぞれ説明されている全翼および結合翼 (図1) の設定でした。これらの設定では、剛体に自由度を与えるモデルをサポートする必要があったため、風洞でモデルを「飛ばす」必要がありましたが、それはプロジェクトの複雑性が著しく高まり、リスクが増加することを意味していました。しかし、AFRL、ボーイング社、および NASA Langley Research Center が参加した実際のテストでは、飛行制御則向けのデジタルコントローラシステムと、サーボ制御ループ、ウォッチドッグシステム、および緊急制御則向けのデジタルコントローラシステムの2つを使用することにより、テストを安全に行うことができました。この記事では、結合翼のテストに焦点を当てながら、制御に用いられたアーキテクチャとそれらに実装された dSPACE システムについて説明します。

テストの設定

結合翼型 SensorCraft 機 (JWS) のテストは NASA TDT で実施されました。TDT は、空力弾性と空力サーボ弾性問題の把握や解析、解決を専門に行う唯一の国立施設であり、面取りされた 16 フィート平方のテスト空間を備えた閉回路型の連続流変圧風洞を提供しています。この風洞

>>

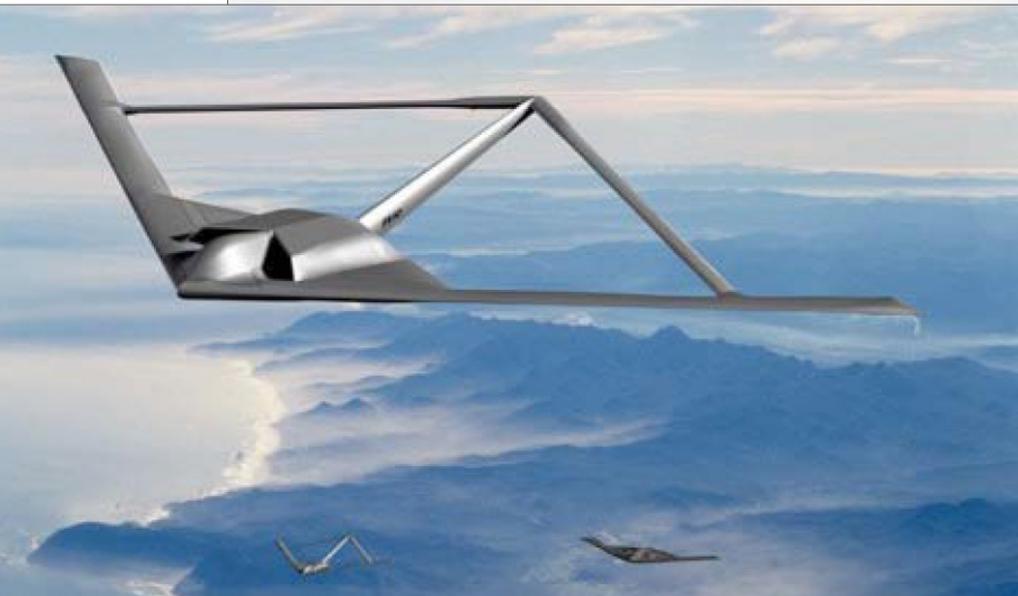


図1：結合翼型 SensorCraft 機の設定。

は、マッハゼロ近くから 1.2 までの速度で空気または重い気体を流動させることができるテスト媒体として機能します。TDT はフラッタテスト用として特別に構成されているため、モデルを制御室から確実に視認できます。モデルの安全性を確保するため、風洞は急速停止させることも可能です。TDT には気流振動システムも装備されており、さまざまな風洞テストで使用した突風を再現してシミュレートすることもできます。図 2 は、JWS とサポートシステムをイラストで示しており、上昇と下降の自由度が 2 つの矢印で示されています。

図2：NASA Langley TDT にある 2 つの自由度をサポートするシステム上で AEI プログラムを実践する結合翼型 SensorCraft 機モデル。

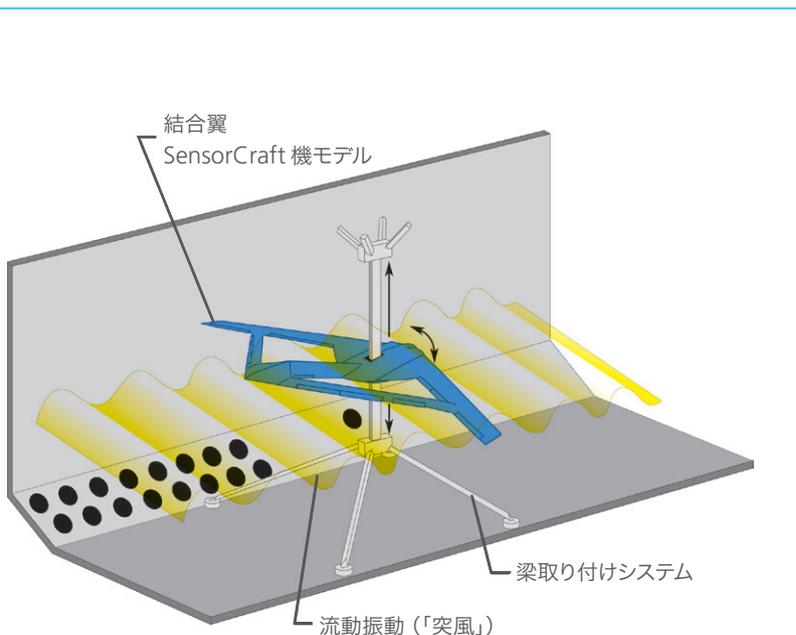


図 3 は、TDT 内に設置された JWS モデルの写真です。サポートシステムは梁と台で構成されており、安全上、台には剛体運動をリモートでロックするための下降ブレーキと上昇変位リミッタが装備されています。また、このモデルには加速度計、歪みゲージ、レートジャイロ、電位差計、およびそれぞれに RVDT (回転式可変差動変圧器) 位置センサを備えた合計 13 個の油圧駆動高帯域幅操縦翼面を使用した大規模な計器スイートも搭載されています。操縦翼面は、前進翼と後部尾翼にそれぞれ 6 面、方向舵に 1 面という形で翼

の後縁に配置されています。テストを行う際、JWS 風洞モデルの外部には、2 つの dSPACE デジタル制御システム、市販のシグナルコンディショニングシステム、RVDT 用カスタムシグナルコンディショナ、Moog サーボバルブ、各種電源、カスタム緩衝器制御システムなど、さまざまなコンポーネントを統合する必要があります。図 4 に、風洞モデルと各種システム間の接続を示す回路図を示します。dSPACE ユニットの外部の信号は、すべてアナログ信号です。1,000 Hz のフレームレートで動作するデジタル制御システム (dSPACE 1) にのみ送られるアンチエイリアスフィルタは、RVDT に対して 400 Hz に設定され、その他のすべての信号は、200 Hz のフレームレートで動作するもう一方のデジタル制御システム (dSPACE 2) との互換性を維持するため、100 Hz でフィルタリングされました。データの取得は、TDT Data Acquisition System (DAS) により、500 Hz のサンプリングレートを使用して行われました。

制御システム

JWS の風洞テストは、2 つの dSPACE システムを使用して制御されました。RVDT、サーボバルブ、およびウォッチドッグシステムを採用した操縦翼面の位置決めには複数のサーボ制御ループが使用されましたが、それらはいずれも dSPACE 1 に実装されました。また、飛行制御 (機体バランスと GLA) 向けには dSPACE 2 が使用されました。緩衝器制御システムはこの風洞テストのための特別設計で、ラッチ回路、各種スイッチ、および電源装置を搭載していました。剛体運動をロックアウトする場合は、緩衝器制御システムにモデルのソレノイドバルブと油圧アクチュエータを搭載して使用しました。このシステムは手作業で遮断することも可能でしたが、dSPACE 1 で動作する自動ウォッチドッグシステムの「Snub!」コマンドが確実に動作してモデルの安全性が維持されたため、手作業での遮断は発生しませんでした。図 5 に、2 つの dSPACE システムと緩衝器制御システムにおける主要機能を示します。これらのシステムにおいてユーザーが入力する箇所は、ダークグレーで示されています。GLA および機体バランス制御に関する法則は、dSPACE 2 の飛行制御ブロック内に実装されました。この飛行制御ブロックには、GUI インターフェースが

採用されました。また、システムのリセットや離陸シーケンスの開始などの特定のイベントを制御または開始するためのプログラミングロジックも搭載されました。パラメータの識別テストを行う際は、操縦翼面に関するさまざまなコマンドの組み合わせに対し、励磁信号を追加することができました。これらのコマンドは、アナログ信号として dSPACE 1 に出力されます。dSPACE 1 には、アクチュエータの過度な動作を防止するための出力飽和ブロックを備えた独立型の PID 制御ループであるサーボ制御ループに加え、ウォッチドッグシステムが実装されました。ウォッチドッグシステムはモデル信号を監視し、欠陥が検出された場合は、「Snub!」コマンドを発行して、図 5 のスイッチ経由で緊急制御側に制御を転送します。結合翼のテストでは、緊急コントローラは 0° 操縦翼面コマンドだけで構成されていましたが、参考文献 1 に記載されているテストでは閉ループコントローラが使用されました。図 5 の通り、各システム間では、緩衝器制御システムから dSPACE 1 に送信されるステータス信号、dSPACE 2 から dSPACE 1 に送信される FlightMode 信号、および dSPACE 1 から緩衝器制御システムに送信される Snub! 信号により、相互に通信が行われました。テストでは、これらの通

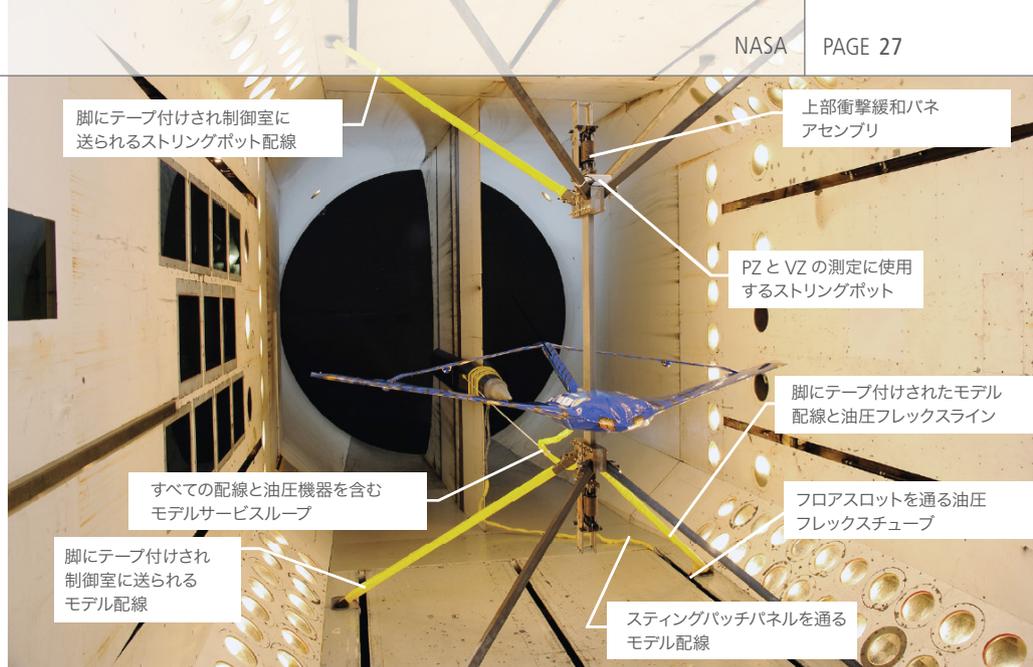


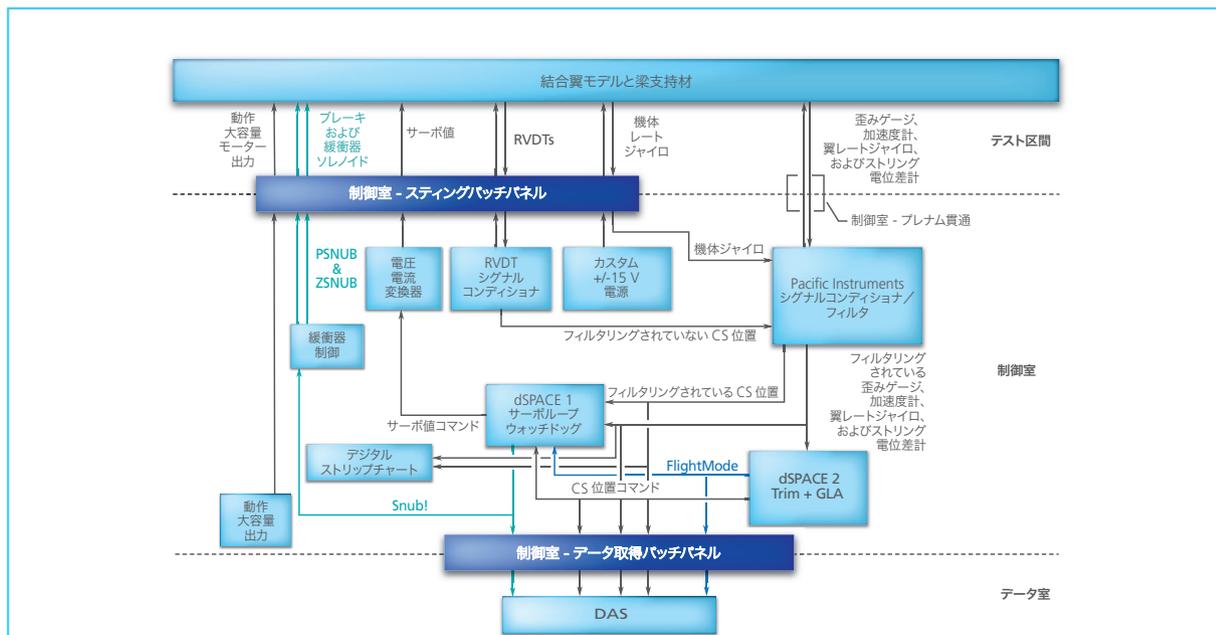
図 3 : NASA Langley Transonic Dynamics Tunnel でテストされる結合翼型 SensorCraft 機。

信手段を取りながら、適切なユーザー入力を行うことにより、下降ブレーキと上昇リミッタをかけた状態の垂直移動範囲の下限から、垂直移動範囲の中央で自由に飛行する状態までモデルを移行させることに成功しました。これにより、結合翼風洞テストの重要な課題の 1 つを解決することができました。使用された手順は参考文献 2 に詳述されているため、この記事では省略します。図 6 に、dSPACE 2 飛行制御ブロックの主な機能を示します。このブロックの主要コンポーネントは、機体バランスブロック、GLA ブロック、

FlightMode ロジックブロック、および欠陥検出ブロックであり、モデル信号、緩衝器関連信号、オペレータ入力、および関連モデル信号が示されています。機体バランスコントローラには、シートホールドと高度 (Z) ホールドの 2 つの動作モードがあり、正確な動作モードはユーザー入力とモデルの垂直位置によって決まります。機体バランス制御ブロックには、垂直位置の設定点を下限の停止位置から風洞の中央線まで傾斜させるためのロジックも含まれています。GLA 制御ブロックの動作は、ユーザーが入力する GLAMode に応じて制御

>>

図 4 : 結合翼のテストで使用される信号ルーティング。



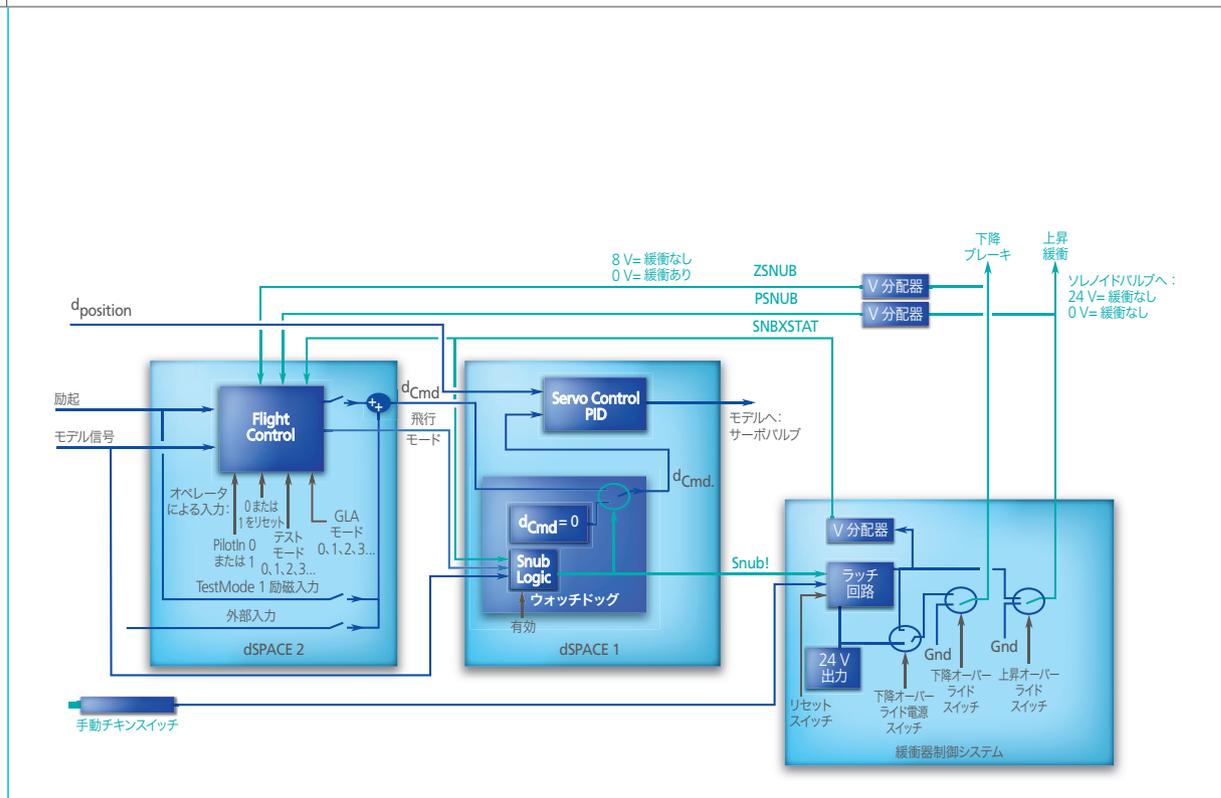


図5：dSPACEシステムと緩衝器の制御用ブロック図。

されます。GLAModeが0に設定されている場合、GLA制御ブロックは操縦翼面コマンドを通過します。このパラメータが0より大きい場合は、歪みゲージのフィードバックによりGLA操縦翼面コマンドが生成され、機体バランスコントローラに追加されます。機体バランスコントローラは、風洞でモデルを離陸、飛行、および着陸させるのに使用されるだけでなく、

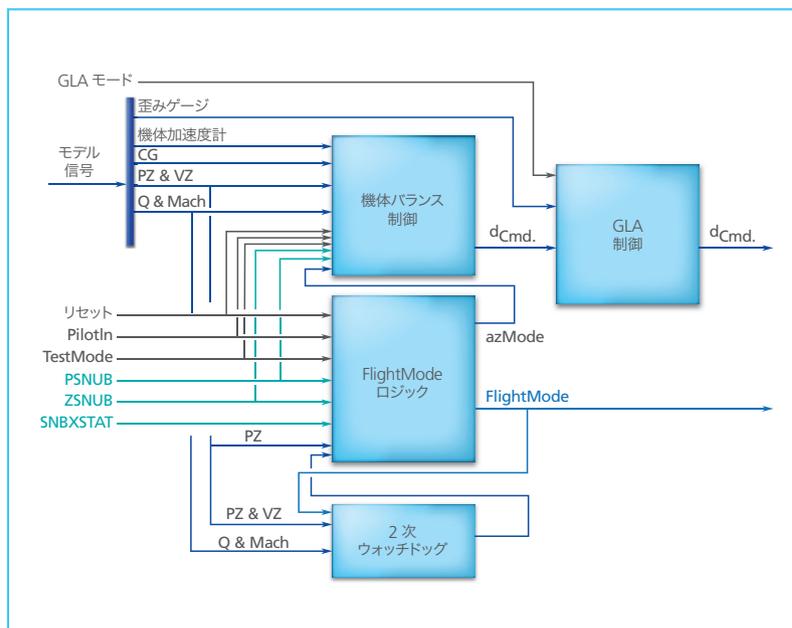
GLAの減少の基準となるようにも設計されています。機体バランスコントローラは垂直(Z)ループと上昇(θ)ループの2つの主要要素で構成されており、垂直ループは加速コマンドの生成に使用する単純なPIDコントローラで構成されています。上昇ループは、加速コマンドから昇降舵面コマンドを生成するPIDコントローラと加速フィードフォワードコントローラを組み

合わせて構成されています。これらの2つのループでは、モデルの重心に基づいてゲインが調整され、使用されます。周波数が高い場合は、1つの操縦翼面コマンドが3次ローパスフィルタを通過するように設定し、応答性を緩和します。

dSPACE システム

dSPACE Digital Control System (DCS) はそれぞれ、ホストコンピュータ、ターゲットシステム、キーボード、モニタ、入出力用BNCパッチパネル、無停電電源装置を格納したラックで構成されています。DCSの中心部は、3枚のdSPACE DS2002 Multi-Channel A/D Boardと1枚のdSPACE DS2103 Multi-Channel D/A Boardを接続した2.6 GHz AMD Opteron™ プロセッサ搭載のdSPACE DS1006 制御プロセッサボードで構成されています。A/Dボードには、それぞれ ± 10 Vの入力レンジで16ビット量子化を使用するチャンネルが32個含まれています。D/Aボードには、 ± 10 Vと10 μ 秒の整定時間を設定した14量子化ビットを使用するチャンネルが32個含まれています。コントローラソフトウェアはMATLAB®/Simulink®環境で開発されており、dSPACEおよびMATLAB Real-Time Interfaceを使用してコンパイルされ、ターゲットプロセッサにダウンロードされます。ControlDesk® アプリケー

図6：飛行制御システムのブロック図。



ションは、dSPACE ツールに不可欠なコンポーネントです。ControlDesk を使用すると、GUI を開発および実装する際にターゲットプロセッサにユーザーインターフェースを提供することができます。ホストコンピュータで GUI を実行することにより、プロセッサ間のすべての通信を制御できるようになります。 ■

David A. Coulson 氏および Robert C. Scott 氏、NASA

参考文献

[1] Scott, R., Vetter, T., Penning, K., Coulson, D., and Heeg, J. 著、「Aeroservoelastic Testing of Free Flying Wind-Tunnel Models Part 1:A Sidewall Supported Semispan Model Tested for Gust Load Alleviation and Flutter Suppression」、NASA/TP-2013-218051、2013 年 10 月

[2] Scott, R., Castelluccio, M., Coulson, D., and Heeg, J. 著、「Aeroservoelastic Testing of Free Flying Wind-Tunnel Models Part 2:A Centerline Supported Fullspan Model Test for Gust Load Alleviation」、NASA/TP-2014-218170、2014 年 2 月

結果

閉ループの風洞テストは約 6 週間実施されました。テスト期間中、機体バランスと GLA コントローラ的设计、実装、テスト、および評価が何度も繰り返し行われ、機体バランスコントローラと GLA 制御則の両方の改良が続けられました。テストの進行につれ、テスト手順は改善されてゆき、最終的にはパラメータ識別データセットを高精度化することができました。これらのデータセットは、解析モデルのさらなる改良に使用され、機体バランスと GLA コントローラ設計の完成度は向上しました。最終的に、-10% の静的マージンと少なくとも 50% の構造応答の短縮を実現した機体バランスが実現し、飛行の実演にも成功しました。この風洞テストが成功したのは、dSPACE システムをカスタマイズおよび再設定することで、業界標準の MATLAB コンピューティング環境との互換性を維持することができたためです。TDT が東海岸にあるにもかかわらず、制御則の開発作業を西海岸のチームメンバーが行うことができたという事実が何よりの証拠です。dSPACE システムにより、制御システムが更新されるたびに、それをほんの数分で Simulink モデルとして TDT に送信することができたため、モデルを既存のフレームワークに容易に落とし込み、コンパイルしたうえで、実行可能な状態にすることができました。このため、多数の制御設計を何度も繰り返しテストすることができ、輝かしい成果につなげることができました。

David A. Coulson 氏
NASA TDT で能動制御を担当した
シニアリサーチエンジニア、Analytical
Services & Materials 社 (米国、バージニア州ハンプトン)



Robert C. Scott 氏
NASA Langley Research Center の
空力弾性部門シニア航空宇宙エンジニア
(米国、バージニア州ハンプトン)

