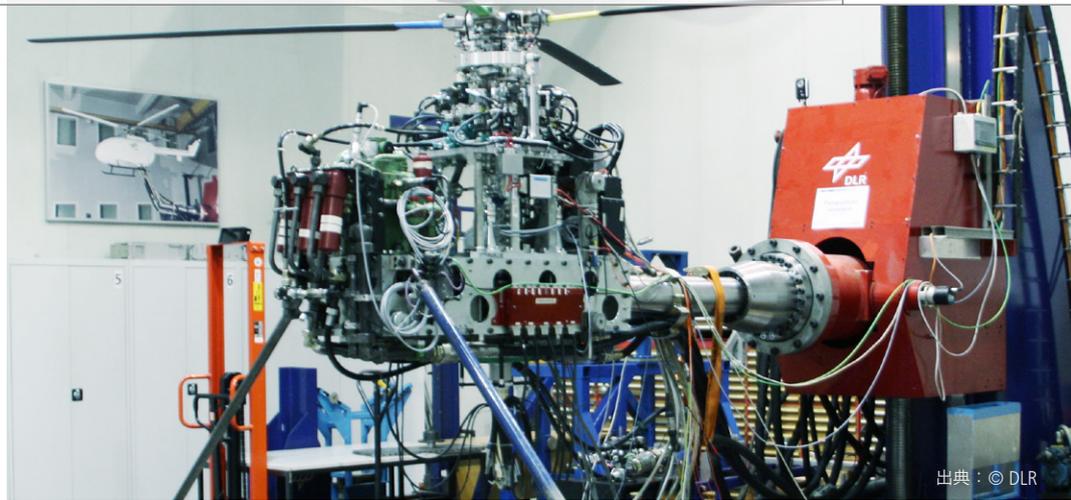


ヘリコプターにとって望ましい推力と揚力は、ローターの高速回転により生み出されますが、その際には大きな騒音が発生します。ドイツ航空宇宙センター (DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) は、新しいタイプのローター制御により、ヘリコプターが空中へと上昇する際に生じる騒音と振動を大幅に低減できることを証明しました。



# Agile Blades

ヘリコプター用のマルチスワッシュプレートシステム  
による騒音と振動の大幅な削減



出典：© DLR

ヘリコプターのローターを動的に制御するための DLR のテストシステム

ヘリコプターが前進飛行する場合、前方移動により発生する気流とローターブレードの回転による気流が重なってしまいます。そのため、ローターディスク内の気流条件は極めて非対称的なものになり、動的失速、騒音、振動などのさまざまな空力的、空力弾性的、および空力音響的な効果が発生する原因となります。通常、これらの効果はローターの回転周波数とその整数倍値（ローター調波周波数）の間隔において周期的に発生します。これらを無効化、あるいは少なくとも緩和するには、ヘリコプターのローター制御の仕組みそのものを改善する必要があります。

#### ヘリコプターの制御

ヘリコプターの主要な機械制御ユニットは、スワッシュプレートと呼ばれます。スワッシュプレートは、すべてのメインローターブレードのピッチ角の変化により揚力を変化させるコレクティブピッチ制御、および前方および側方への推力に影響を与えるサイクリックピッチ制御を組み合わせることにより、操縦士の指令を回転ブレードに送信しています。しかし、サイクリックピッチ制御では、ローターが1回転するたびにブレードのピッチ角が変化してしまいます。

#### 対策

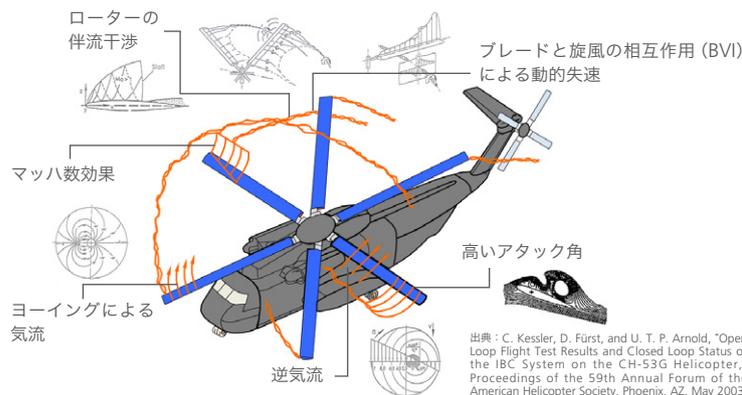
このような意図しない効果を緩和するには、ローター周波数および低振幅の整数倍値を用いてローターブレードをシミュレートすることで、ローターブレードのピッチ角を修正します。振動を削減するには、制御信号の周波数、振幅、および位相を調整して、振動が干渉により打ち消される

ようにします。このようにすると、ローターの放射雑音や消費電力も減少するというプラスの効果も生まれます。従来の（コレクティブおよびサイクリックによる）ヘリコプター制御は、意図しない空力効果による高調波の増大には効果的に対応できず、飛行姿勢の制御のみに使用されてきました。このため、早くも20世紀中頃には、多くの研究者が動的なローター制御によって上記の現象やその効果を無効化する試みを続けてきました。動的なローター制御では、あらゆるブレードのピッチ角を主制御によって変化させると共に、ローター周波数の一定の倍数（ローター調波周波数）で高周波ピッチ角を変化させます。これにより、ヘリコプターの振動と放射雑音が大幅に削減され、推力と揚力も強化することができます。

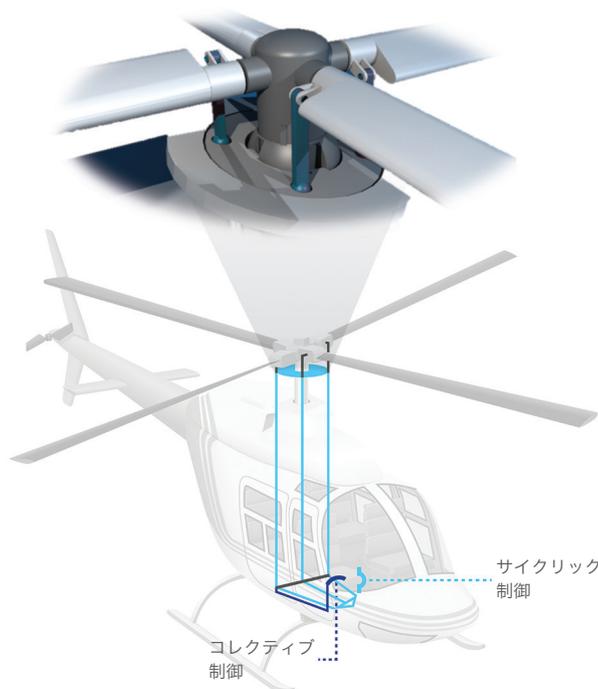
#### 動的なローター制御

動的なローター制御に対するこれまでの手法には、多くの重大な欠点がありました。（アクチュエータを介した）ピッチ角をスワッシュプレートの動作によって動的に変化させるシステムでは、IBC（個別ブレード制御）を行えるのは、最大3枚までのブレードを持つローターのみです。この手法の場合、現在一般的な4枚以上のブレードを持つローターでは、スワッシュプレートの運動学的な理由から限界が生じてしまいます。その他の手法を使用したシステムでは、IBC性能は十分に発揮できますが、アクチュエータを高い負荷のかかる回転システムで使用し、エネルギーおよび制御信号の供給をスリップリングを介して行う必要があるため、それ自体が大きな課題となる場合があります。

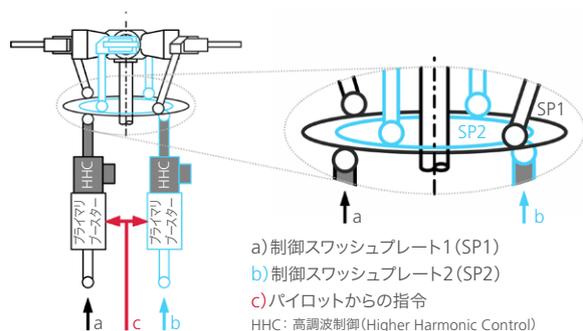
&gt;&gt;



ヘリコプターの前進飛行におけるローターの空力現象



ヘリコプターの垂直および水平飛行は、スワッシュプレートを介したローターブレードのコレクティブおよびサイクリックピッチ制御により実現します。



マルチスワッシュプレートシステムの仕組み: 1つのスワッシュプレートで向かい合う2枚のローターブレードを制御します。

出典: © DLR

### 新たなアプローチ: マルチスワッシュプレート

DLR が特許を取得したマルチスワッシュプレートシステム (META) は、動的なローター制御を行える新しい手法です。このシステムは、ブラウンシュヴァイクにあるローター用テスト装置の4ブレードローターでテストされています。DLRのテスト装置では、電子油圧制御アクチュエータを使用して複数の同軸スワッシュプレートの高周波動作を行っており、ローター上の個別のブレードピッチ角に対して必要な動的変化をスワッシュプレートで生み出せるようになっています。アクチュエータはスワッシュプレートの下部に取り付けられており、2枚のブレードにそれぞれ連結されています。複数のスワッシュプレートを使用すると、それぞれのローターブレードのピッチ角を個別に修正しながら、さまざまな制御機能や周波数を使用した制御も行えるようになります。このように、METAでは既存の手法の利点を適切に組み合わせ、欠点を回避しています。

### 初期のテストセットアップ

マルチスワッシュプレートシステムのテストは、Federal Aeronautical Research Programme の VAR-META (マルチスワッシュプレート型フルアクティブローター制御) プロジェクトの一環として、ブラウンシュヴァイクにある DLR のローター用テスト装置において初めて行われました。これらのテストでは、直径約 4 m の Bo105 無関節型ローターによるマッハスケールの風洞モデルが使用され、マルチスワッシュプレートシステムが初めて実装されました。マッハスケールでは、気流条件によって実際のヘリコプターローターの条件が大きく左右されますが、ローターの速度も増大します。このプロジェクトでは、電子油圧制御アクチュエータをどのように制御し、2つのスワッシュプレートを適切に配置および動作させるかが大きな課題でした。ここでは、4枚のローターブレードすべてのピッチ角に必要な変化をアクチュエータ側の対応するピストン動作に反映させる必要がある一方で、これらのアクチュエータの動作も動的に制御する必要がありました。

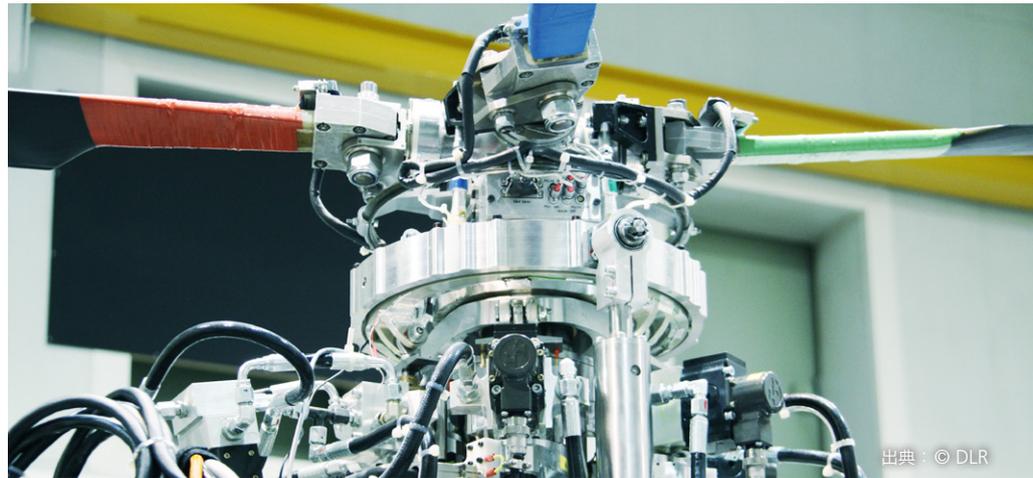
### コントローラの要件

オープンループおよびクローズドループ制御システムの要件は厳しく、テスト

におけるモデルのローター回転速度は 1050 rpm でした。そのため、第 1～第 6 ローター高調波の予定ブレード制御周波数では 0 Hz (静的位置)～105 Hz の範囲のアクチュエータ周波数が発生しますが、その中で高精度 (約 0.05 mm) な制御を実現する必要がありました。アクチュエータの最大ストロークは±4 mm であり、これはローターブレードのピッチ角である約±3.7°に対応します。ローターブレードのピッチ角は、常にその時点のローター方位角に依存します。そのため、現在の方位角の情報を提供する各種トリガ信号の作成は、ローターマストの角度エンコーダを使用して行われます。これらのトリガ信号は、ローター用テスト装置のあらゆるオープンループおよびクローズドループ制御や計測システムでも使用されます。また、求められる高精度な制御を実現するため、マルチスワッシュプレートシステムのアクチュエータの制御回数は 1 回転当たり 256 回となり、ローター周波数が 17.5 Hz の場合に制御システムでほぼ 4.5 kHz のクロック速度が得られる必要があります。つまり、信号処理や解析、フィルタおよびフィードフォワード制御を含め、6 つのアクチュエータ制御および関連するクローズドループ制御の計算はすべて、この速度で処理されます。

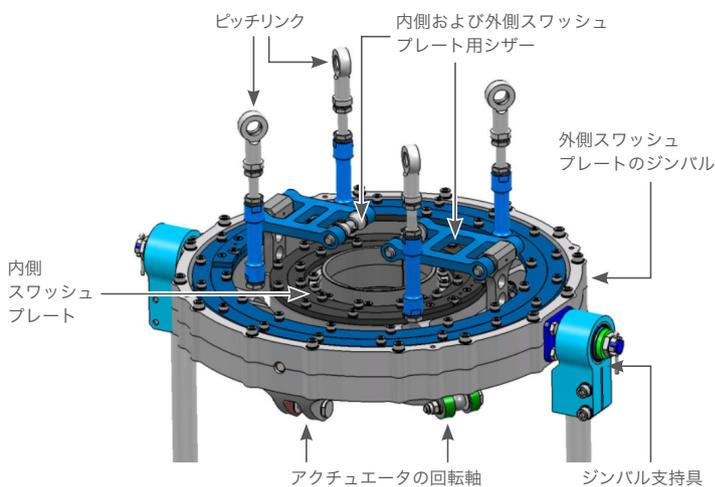
#### コントローラモデルの開発

DLR ではまず、システム全体の動作を MATLAB®/Simulink® でモデル化し、リアルタイムで実行可能な制御法則を導き出しました。目的の制御パターンで求められるアクチュエータ動作を計算する場合は、個別のピッチ角の変化 (およびカップリング項) を対応するアクチュエータ用制御信号に変換する制御マトリクス (50 カラム以上の場合もあり) を使用しました。アクチュエータ制御の段階では、フィードフォワードループを使用した PID コントローラ構成を使用しました。完全な高調波信号解析とデジタル 8 次ローパスフィ



出典：© DLR

マルチスワッシュプレートシステムのプロトタイプ作成



マルチスワッシュプレートシステムの機構

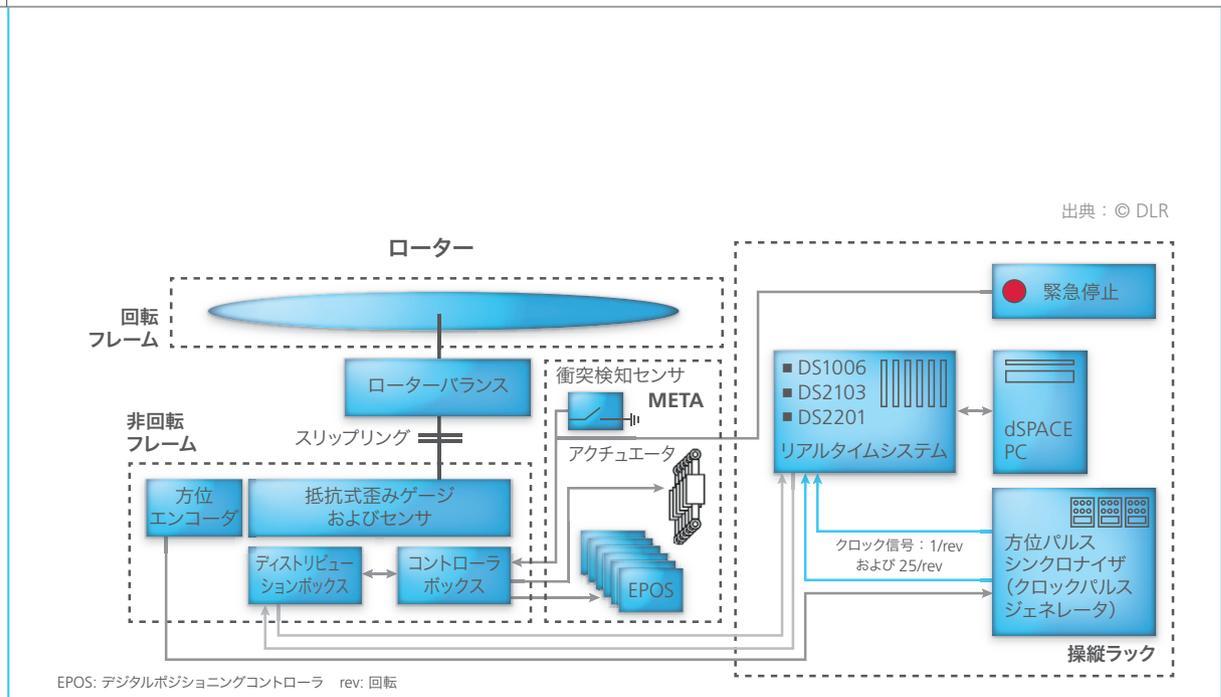
出典：© DLR

ルタが含まれているフィードフォワード制御では、6 つのアクチュエータに対して制御信号を同時に計算する際にも非常に厳しい要件が求められました。アクチュエータモデルやオープンループおよびクローズ

ドループ制御のモデル化および妥当性確認を Simulink で行った後は、実際のテストでのハードウェア制御に向けて、システムをリアルタイムで実行できるようにする必要がありました。 >>

「当社では、強力な dSPACE リアルタイムシステムを使用することにより、動的なローター制御のアルゴリズムを幅広くテストし、マルチスワッシュプレートコンセプトの機能性を確実に証明することができました」

Philip Küfmann 氏、ドイツ航空宇宙センター (DLR)、ブラウンシュヴァイク



テストセットアップの信号フローチャート

### リアルタイムに実行可能なコントローラ の設計

マルチスワッシュプレートシステムのオープンループおよびクローズドループ制御モデルの実装には、クワッドコアの DS1006 Processor Board および DS2103 および DS2201 I/O ボードを搭載した dSPACE システムが使用されました。テストでは、Ethernet モジュールを使用して計測用コンピュータやデータサーバとの通信を行いました。Simulink でモデル化した制御モデルのテストは、複数のプロセッサコアに分散して行われ、オープンループ制御、

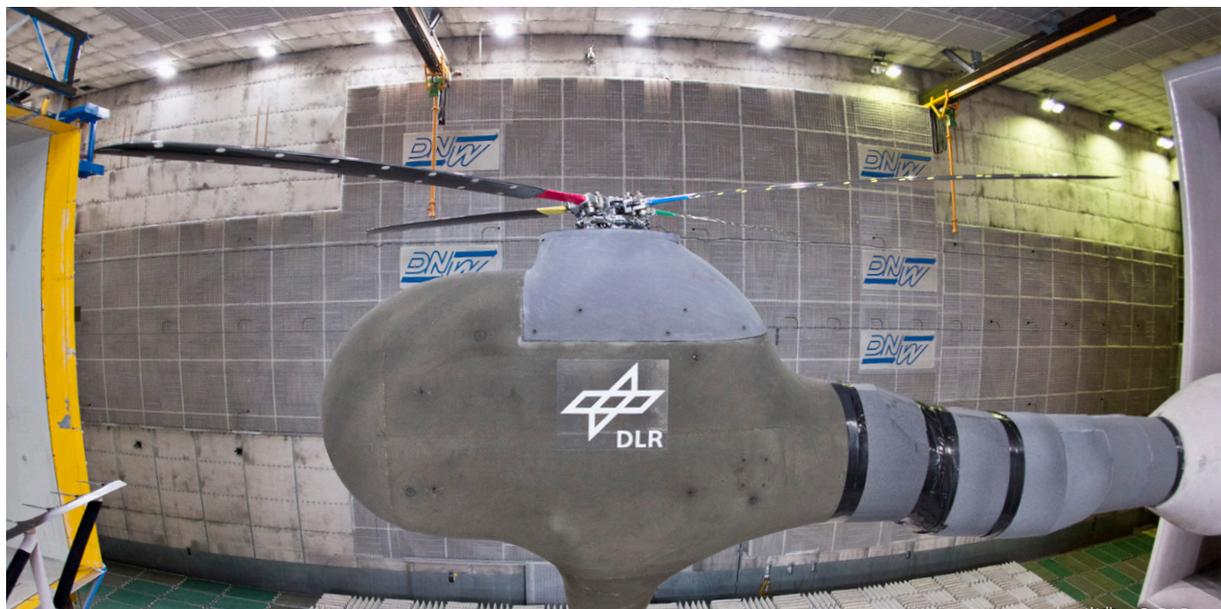
クローズドループ制御、およびネットワーク通信などのその他のタスクにはコアが 1 つずつ使用されました。制御モデルのコンパイルおよび dSPACE システムでの実行の際には、Real-Time Workshop™ が使用されました。また、角度エンコーダの信号を使用してハードウェア割り込みによるプログラムのトリガを行えるようにして、プログラムを残りの制御モデルや計測用ハードウェアと同期的に実行できるようにしました。これにより、制御ステップ当たり 250 μs を下回るクロック速度という厳しい要件を満たしながら、制御時に必要

な精度を達成することができました。開発者は、ControlDesk® Next Generation や特別に設計された GUI を使用することにより、コントローラゲイン、フィードフォワードパラメータ、制御周波数および振幅など、動作中のすべての重要なパラメータにアクセスすることができました。

### まとめと次の段階

DLR ブラウンシュヴァイクでは、システムの IBC 性能をテストおよび実証することにより、VAR-META プロジェクトを成功に導きました。その後、ハードウェアおよび

風洞内の試験セットアップ



出典：© DLR