

心臓移植を待つ患者の多くは通常、人工心臓のポンプを体内に埋め込むことで、実際の心臓移植手術まで命をつなぐ必要があります。クイーンズランド大学の研究者達は、このような人工心臓向けの制御アルゴリズムの開発のため、人間の血管システムをPC上でモデル化し、それを人工心臓と接続しました。

**現** 市販されている脈動型（つまりリズムカルにポンプ運動をする）人工心臓には、いくつかの重大な欠点があります。最大1年と消耗期間が短く、エネルギー消費量も多いだけでなく、サイズも比較的大きいため、移植できるのは男性の約75%であり、女性ではさらに減少し、子供への移植は不可能です。一方、回転ポンプは、サイズも小型で耐久性とエネルギー効率に優れており、継続的に血流を供給できるため、脈動ポンプと比べて多くの利点があります。このため、研究者は回転血液ポンプ技術を使用して新しい人工心臓を開発しています。（たとえば、運動や睡眠などで変化する）血流

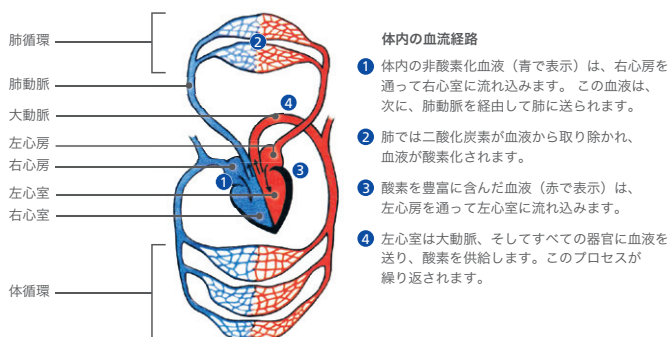
ニーズに合わせてポンプ能力を自動的に調整する機能を人工心臓に搭載するためには、あらゆる状況における人間の血管系をシミュレートできる強力なテスト環境が必要です。

#### PC上で仮想的に血管を再現

これまで、人間の血管系とその特性をラボでリアルにシミュレートするには、管、パイプ、弁、および圧トランスデューサを使用する必要がありました。しかし、この構成では、流体コンポーネントと機械コンポーネントの組み合わせのため、非常に複雑になり柔軟性にも欠けました。クイーンズランド大学の研究者は、このような状況

&gt;&gt;

図1：健康な心臓血管系の血液循環を示す概略図。体内の各領域への血液供給は、脈拍、ポンプ能力、血管収縮などに適応して変化し続ける各部のニーズに合わせて調整されます。





# Virtual Blood Vessels

人工心臓に対する柔軟なテスト環境

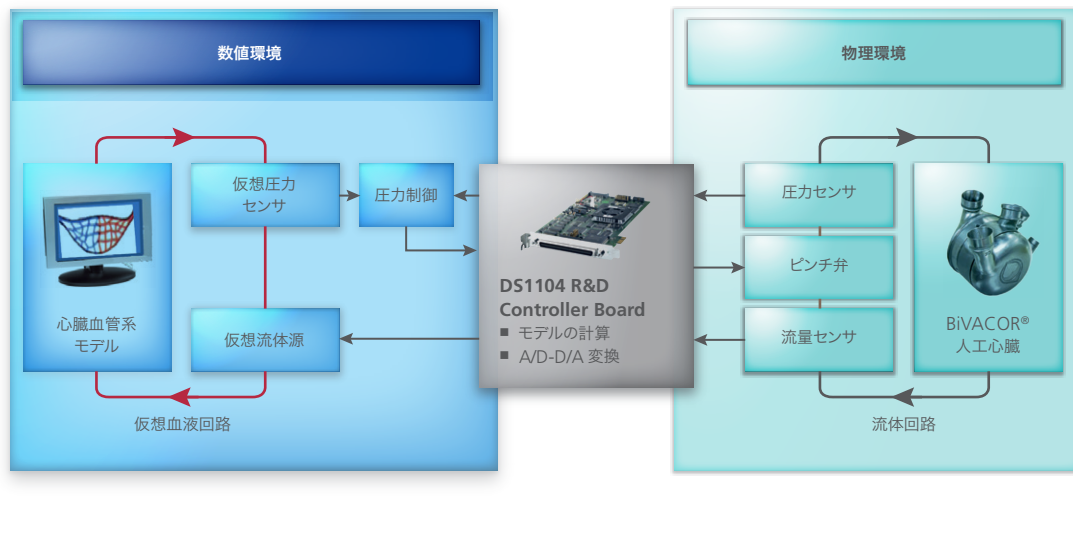


図2: テストベンチ構成の概略図。PC上でモデリングした血管系が、各種センサおよびアクチュエータにより人工心臓に接続されます。このため、血液系の特性の変更も容易です。

を受け、別の方法に着手しました(図2)。これは、標準的なPCをDS1104 R&D Controller Boardで拡張してすべての実験を制御できるようにし、血管系全体を数値モデルとしてモデリングするというものでした。人工心臓を単純なチューブシステムと接続して流体サイクルを構築し、人間の血液とまったく同じ流体特性を示すグリセリンと水の混合物をシ

テムに供給することで、血液の流れをシミュレートします。

#### 人工心臓に対する柔軟なテスト環境

圧力センサ、流量センサ、および管にある複数のピンチ弁が、PC上の血管モデルと機械的な人工心臓間のインターフェースとして機能します。ピンチ弁は、人間の血管系における実際の血流と模擬血液の流れ

が等しくなるよう制御します。血管の弾性などの血管系の特性はPC上で簡単に変更できるため、静止状態や動作状態などさまざまなシナリオを容易にシミュレートできます。これにより、人工心臓の制御アルゴリズムの総合的なテストが可能になります。

#### dSPACE 機器を使用した人工心臓のテスト

(圧力および流量)センサとアクチュエータ(ピンチ弁)は、PCに取り付けたdSPACE DS1104 Boardに接続します。中央ユーザインターフェースの開発には、dSPACEの試験ソフトウェアControlDesk Next Generationが使用されました(図3)。このソフトウェアは、データを記録し、血管の抵抗や弾性などのパラメータを変更し、さまざまなシステム状態をグラフィカルに表示する役割を果たします。人工心臓の心臓血管モデルと制御アルゴリズムはMATLAB®/Simulink®で開発され、1msのステップ幅で実行されました。

図3: dSPACE 試験ソフトウェアControlDesk Next Generationは中央ユーザインターフェースとして機能し、データの記録、パラメータの変更、および各種システム状態のグラフィカルな表示を行います。



#### 日常的なシナリオのシミュレーション

前述の構成がどれほど入念に考えられているかは、日常の生活を科学的に捉えると実感できます。人が立ち上がると、筋肉が活性化することで全身抵抗が下がります。寝そべっている状態から立ち上がると、体液が胸部から下肢に移動します(体積の

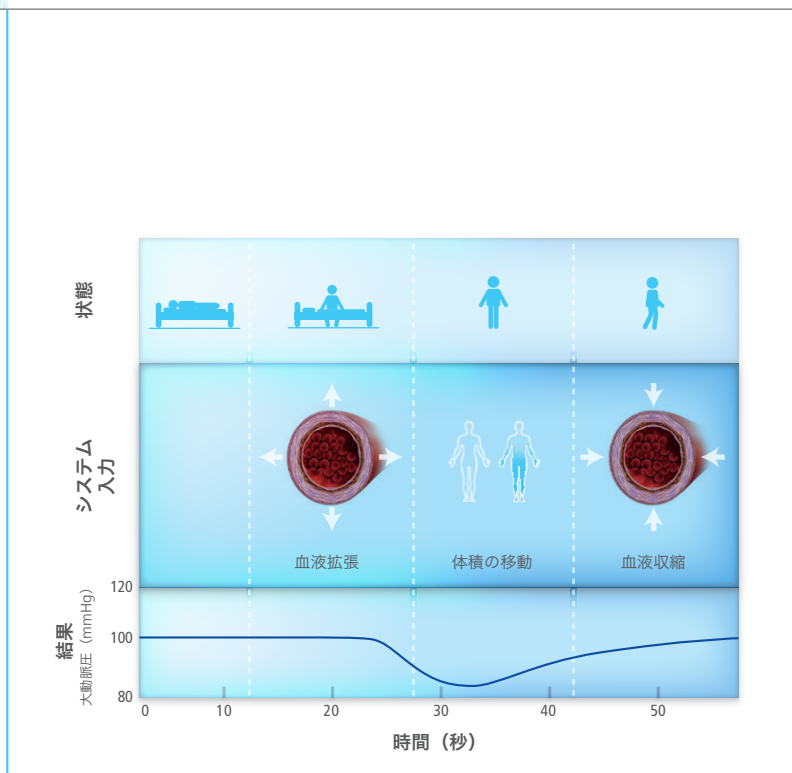


図4：人が立ち上がった場合のシミュレーションにおける人工心臓血管系の大動脈圧の曲線は、人体の場合とまったく同じ反応を示しています。

下部移行)。これに反応して、血管が収縮し始め、抵抗が戻って以前より高い値で落ち着きます。最後に、脚の筋肉が持つポンプ効果により体液が再分散されます（体積の上部移行）。これが、立ち上がった後もめまいや失神が起こらない仕組みです。シミュレーションモデルでは、一連の動作をプログラミングすることで、このプロセスを再現しました（図4）。弾性の変化による体液の移動や、血管の拡張、収縮は異なる抵抗値として置き換えられました。このシミュレーションで得られた血圧の一時的な特性は、人体での実際の作用と一致しました。■

クイーンズランド大学、  
Frank Nestler 氏

「dSPACE システムを使用することで、BiVACOR 人工心臓のための柔軟で効率的な開発環境を構築できました。」

クイーンズランド大学、Frank Nestler 氏

## まとめ

人工心臓向けのテスト環境の構築に dSPACE ツールを使用することで、残る機械的なコンポーネントは人工心臓だけという状況になりました。この開発環境では、人間の血管系全体を PC 上でモデリングしているため、特性の変更は迅速かつ効率的に行えます。また、要件の異なる人工心臓の場合でも、再現可能な（自動）テストを作成することができます。これにより、制御アルゴリズムの開発がはるかに容易になります。



Frank Nestler 氏  
クイーンズランド大学博士候補  
(オーストラリア、ブリスベン) 兼  
Texas Heart Institute 研究エンジニア  
(米国、テキサス州ヒューストン)

