

エンジンの革新的な燃焼プロセスの開発では、多くの場合、進行中の燃焼プロセスにもエンジニアが介入できる極めて高速な制御ループが必要です。アーヘン工科大学 (RWTH Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) では、dSPACE MicroAutoBox II を使用することで、ガソリンエンジンのインサイクル制御において安定性と制御性に優れた自動点火を実現しました。

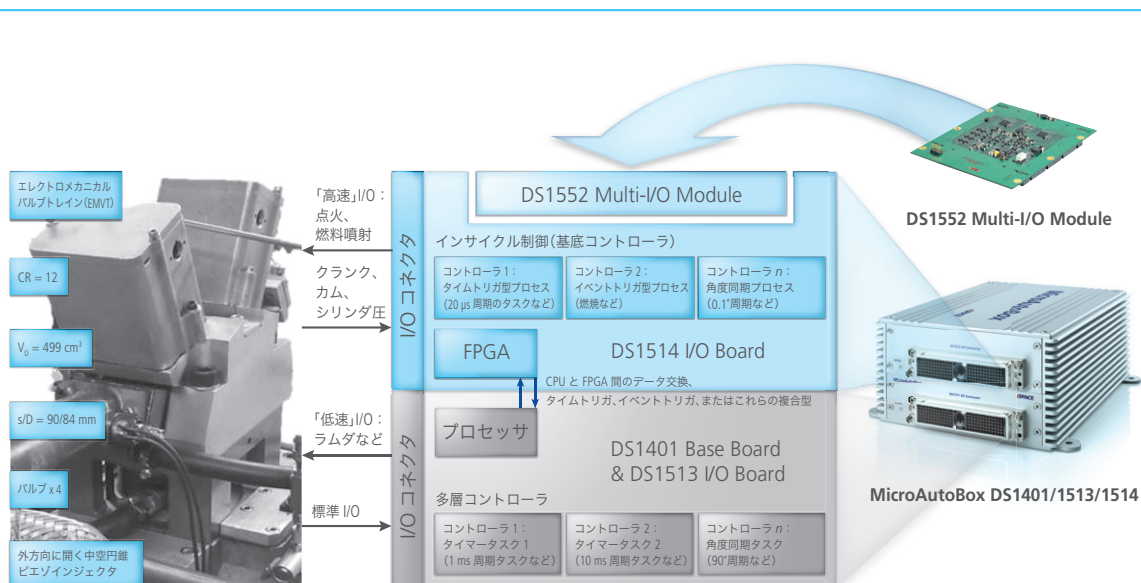
代 替的な推進テクノロジーについて検討する場合、今日の開発者はエレクトロモビリティの側面だけに注目する傾向がありますが、内燃エンジンについて考える際は、それは短絡的である場合があります。なぜなら、段階的に廃止されると思われる内燃エンジンには発展の可能性も依然としてあるからです。新しく革新的な燃焼行程を備えた内燃エンジンには、大幅な効率改善が期待されています。たとえば、かつてはディーゼルエンジンでのみ使用されていた自動点火は、ガソリンエンジンにも利用することができます。ガソリン制御自動点火 (GCAI) 方式を使用すると、二酸化炭素、窒素酸化物、および微

粒子の排出を大幅に削減できると期待されています。ただし、GCAI の実装には、複雑な制御および統制プロセスが求められるため、図示燃焼室圧力を入力値として利用するクローズドループが特に有望であるとみなされています。この手法では、開発者は圧力曲線を直接的かつ熱力学的に解析して直ちに燃焼を評価し、インサイクル目標値を調整することができます。アーヘン工科大学 Institute for Combustion Engines (VKA) の研究者は、レイテンシが最小限で、かつ統合指数解析を用いた十分に高速なインサイクル制御を確保するためのラピッドコントロールプロトタイプング手法の研究に日々取り組んでいます。

#### 極めて可変性の高い研究用エンジン

アーヘン工科大学の研究者は、この研究のために、外方向に開く圧電駆動型中空円錐インジェクタを中央に配置した直噴式の単気筒エンジンを使用しています (図 1)。研究用エンジンには、さらに十分に可変性のある電気機械式バルブトレイン (EMVT) が搭載されています。このバルブトレインはクランクドライブから完全に切り離すことができるため、サイクルごとに自動点火に必要な内部の残留ガスを動作点に応じて高い割合に指定することができます。ここでは、自由にプログラミング可能な Xilinx® Kintex®-7 FPGA を搭載した dSPACE MicroAutoBox II が使用されており、計画された研究作業に

図 1 : 電気機械式バルブトレインを搭載した研究用の単気筒エンジン (左)、Kintex-7 FPGA を搭載した開発用 ECU の MicroAutoBox II (右)



理想的な開発用 ECU として機能しています。VKA では、MicroAutoBox II と共に、XSG Advanced Engine Control Solution を初めて使用しました。このソリューションは、Simulink® 内からモデルベースで FPGA 設計を行えるよう作成された、Xilinx System Generator (XSG) ベースのオープンライブラリです。

#### リアルタイム表示

このソリューションの特長は、評価と筒内圧表示 (CPI) をリアルタイムで実行できることです。まず、クランクシャフト、カムシャフト、およびエンコーダ信号が FPGA 上で角度計算ユニット (ACU) によって評価され、さらなるリアルタイム評価に基づいて分解能が  $0.1^\circ$  の角度信号が生成されます。筒内圧信号は 1 MHz でサンプリングされ、クランク角と同期的に処理されます。このプロセスでは、放熱動作、高圧ループの図示平均有効圧、気体交換のほか、ピーク圧や圧力勾配など、インサイクル制御に必要な熱力学データの値が指定されます。ここでは、確実にリアルタイムで実行できるようにするため、因果的アルゴリズムのみが使用されます。VKA の比較テストにおいては、定評のある FEV GmbH の表示ツール Combustion Analysis System (CAS) を使用して、CPI のアルゴリズムに関する妥当性確認を行いました。発生した偏差は 1 パーセント未満で無視できるほど小さく、FPGA の速度でインサイクル制御に必要なパラメータを提供することができました。また、高速なアクチュエータ (EMVT、燃料噴射) も XSG Advanced Engine Control Solution を介して直接制御されるため、制御介入もわずか数ナノ秒以内に行えました。このため、制御介入を 1 燃焼サイクル内で実行し、MicroAutoBox II のプロセッサユニットに実装された低速かつグローバルな制御に対する補正変数として使用することができました。

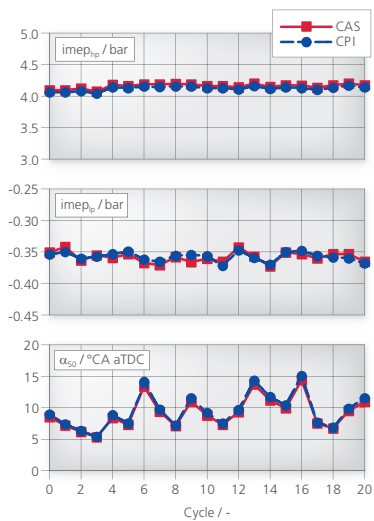
#### インサイクル制御のコンセプト

VKA では、燃焼室の再循環を利用することにより、自動点火に必要な内部残留ガスの割合を高くすることができました。この手法では、気体交換の上死点とは対称的に、排気バルブが早いタイミングで閉じられ、吸気バルブは遅いタイミングで開きます。この段階で、燃焼室に残留している排気ガスが圧縮されます。通常、燃料の

&gt;&gt;

# Firing up Engine Innovation

インサイクル燃焼制御による  
ガソリンエンジンの自動点火



未燃焼の結果として、遅く不完全な燃焼が起こり、その後燃焼が早められて圧力が増大します。中間圧縮時の圧力レベルとその後の燃焼点との間には、明確な相関関係があります。そのため、燃焼が極端に遅いと中間圧縮時に相当の熱が放出されます(図3)。インサイクル制御では、この

図2：Advanced Engine Control Solution およびツールの Combustion Analysis System (CAS) による筒内圧表示 (CPI) の比較例。図示平均有効圧  $imep_{hp}$  および  $imep_{ip}$ 、および燃焼中心 ( $\alpha_{50}$ ) の偏差は無視できるほど低いものでした。

相関関係が利用されており、Advanced Engine Control Solution により中間圧縮時の最大筒内圧信号を決定しています。これが制御ループの入力信号としての役割を担います。吸気バルブが閉まる時のクランクシャフト角は制御変数として使用されており(図4のIVC)、この動作を遅らせることで有効圧縮比が減少し、その結果、自動点火の条件や燃焼中心にも遅延が発生します。吸気バルブを早く閉じると、自動点火が促されるため、燃焼中心が早まります。中間圧縮時に実行される筒内圧のリアルタイム評価によって気体交換の上死点におけるピーク圧が低いと判断された場合、燃焼中心の遅延を防ぐため、閉鎖中の吸気バルブの制御変数は同じサイクル内のより早いポイントへと移動します。逆にピーク圧が高い場合はより遅いポイントへと移動します。その結果、制御ループは気体交換の上死点と吸気バ

ループの作動の間に、およそ  $90^\circ$  CA 以内のクランクシャフト角で閉じられます。これは、 $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  の回転速度での  $10 \text{ ms}$  のタイムスロットに相当します。

#### 説得力のある結果

上述のインサイクル制御の評価では、アクティブな制御を行うことで図示平均有効圧の標準偏差を相当に小さくすることができ、極端な負荷の偏差を回避できることが明確に示されています(図4)。また、燃焼中心も大幅に改善されており、燃焼中心が極端に先行または遅延する状況を実際に回避しています。アーヘン工科大学の研究者は、中間燃焼とその後の燃焼の間にある相関関係を利用することにより、目的のインサイクル制御を実装し、研究用エンジンで使用することに成功しました。また、高速な制御介入が持つ可能性が明白となりました。同大学のさらなる研究プロ

「極めて高速なインサイクル制御が可能な dSPACE ツールは、革新的な燃焼行程の開発を行うための新たな手段です」

Jakob Andert 教授、アーヘン工科大学 (RWTH Aachen)

Bastian Lehrheuer 氏  
Institute for Combustion Engines  
(VKA) 研究員、アーヘン工科大学。



Jakob Andert 教授  
Mechatronic Systems for Combustion  
Engines ジュニアプロフェッサー、アーヘン  
工科大学。



Maximilian Wick 氏  
Mechatronic Systems for Combustion  
Engines 研究員、アーヘン工科大学。



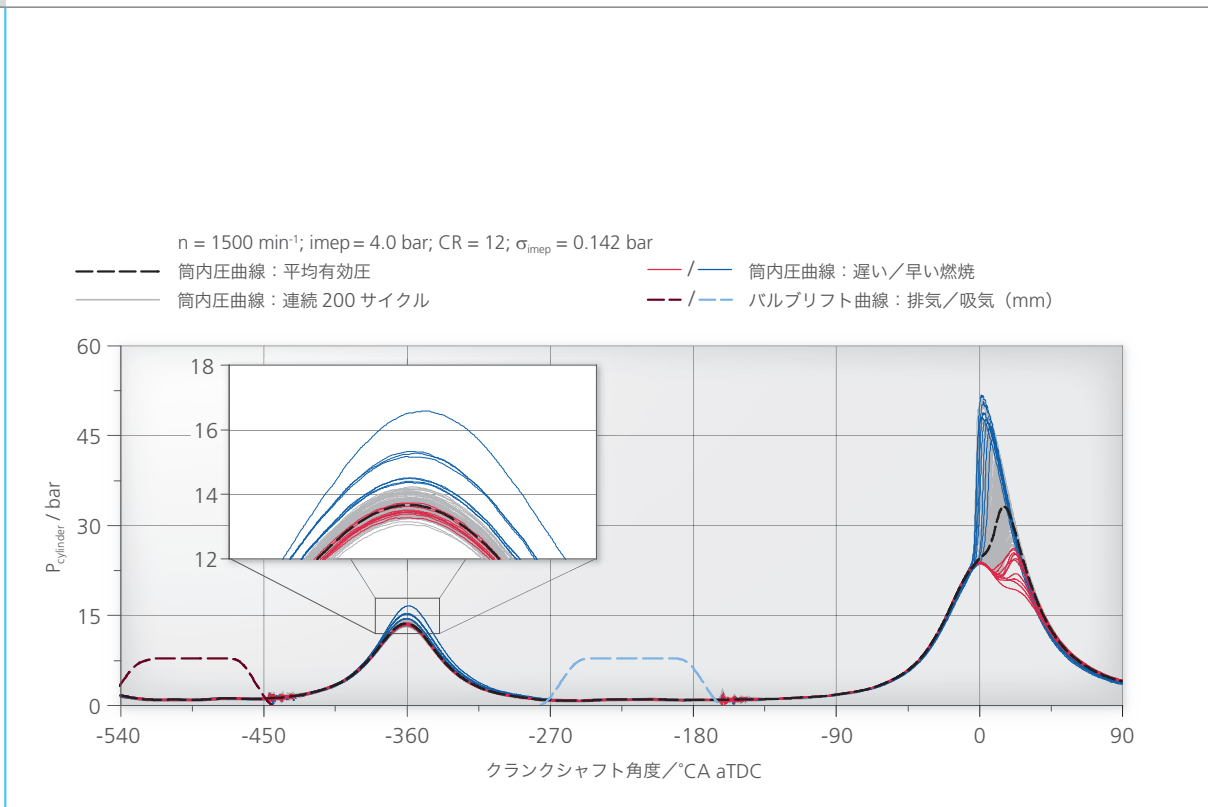


図 3：遅い (赤) または早い (青) 燃焼点を有する筒内圧のトレース図。図示平均有効圧  $\sigma_{imep} = 0.142$  bar の高い標準偏差により数量化した周期変動を明確に表示することができます。

プロジェクトでは、MicroAutoBox II の FPGA 性能を利用して、より一層複雑な制御アルゴリズムの実現を目指します。現状では、研究者は筒内圧のリアルタイム評価によって燃焼プロセスを最適に予測しようとしています。制御変数の分野では、現行のサイクル内での制御介入を許容するためのさらなる研究も必要です。これに関しては、Institute for Combustion Engines が現在、特に頻回噴射や水噴射向けの制御方式を模索しています。そのため、内燃エンジンが段階的に廃止されるモデルとは言えなくなる可能性は十分にあります。 ■

Bastian Lehrheuer 氏、Jakob Andert 教授、Maximilian Wick 氏、アーヘン工科大学

図 4：インサイクル制御の有効時/無効時を含む連続的な 1000 サイクルの間の IVC (閉鎖中の吸気バルブの制御変数)、 $\alpha_{50}$ 、および imep。アクティブ制御では、図示平均有効圧の標準偏差が  $\sigma_{imep} = 0.142$  bar から  $\sigma_{imep} = 0.088$  bar まで大幅に減少します (下)。燃焼中心が極端に先行または遅延する状況を確実に回避しています。

