

# エンジン最適制御研究

## Research of Engine Optimal Control

丸山昌利 航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部  
安田友芝 航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部 部長代理  
遠藤誠 航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部 部長  
黒崎正大 航空宇宙事業本部技術開発センタースタッフグループ 部長 工学博士

ESPR プロジェクト（環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発）の目的の一つである CO<sub>2</sub> 排出量抑制のためには、高度な処理能力をもつ制御システムを構築して燃料消費率を改善させる必要がある。そこで、先進制御機能としてスタビリティシーキング制御、タービンチップクリアランス制御、エンジン性能最適制御などを備え、かつそれらを高度に処理できる分散制御システムを研究開発した。本稿では、これらの制御機能および分散制御システムについて紹介するとともに、エンジン性能シミュレーションで得られた燃料消費率の改善効果を紹介する。

The ESPR program aims to develop environmentally compatible technology, such as low noise, low NO<sub>x</sub>, and low CO<sub>2</sub> engines. In order to reduce aircraft engine CO<sub>2</sub> emission, it is necessary to improve SFC ( Specific Fuel Consumption ) by development of control systems with high speed processing ability. Therefore, a control system with advanced control functions such as, SSC ( Stability Seeking Control ), TCC ( Turbine tip Clearance Control ), SCAC ( Secondary Cooling Airflow Control ) and PSC ( Performance Seeking Control ) has been designed. The control system has been distributed to several units to realize high speed processing. This paper presents the control functions, the distributed control system and effects of SFC improvement by simulation results.

### 1. 緒 言

これまでの傾向から、航空需要は将来的にもさらに増大していくものと予想されている。このような状況において、航空機エンジン技術が現状にとどまると、NO<sub>x</sub> および CO<sub>2</sub> の排出量の増大は避けられず、環境への影響が懸念されている。これに対応する技術として環境適合性に優れた超音速輸送機用システムの基盤技術の研究が進められ、この一環として CO<sub>2</sub> 排出抑制技術の研究を進めた。

エンジンの CO<sub>2</sub> の排出量を抑制するには燃料消費量を削減する必要がある。これはエンジン質量の削減と SFC ( Specific Fuel Consumption : 燃料消費率 ) の向上によって実現される。SFC 向上は制御システムに大きく依存しており、SFC 向上を実現できる制御システムの構築が必要である。

現状の FADEC ( Full Authority Digital Electronic Control ) による集中制御システムは、設計時のエンジン性能で最適になるエンジンサイクルを実現するように制御を行うため、エンジン個々の性能の差や運用による性能の変化で最適なエンジンサイクルでは運転されていない。また、現在、エンジンの燃料消費量低減を目的とした種々の制御

機能の研究・開発が進められており<sup>(1),(2)</sup>、一部では実用化されている。したがって、エンジン性能最適制御および燃料消費量低減のための制御機能を電子制御装置の機能に加えることで SFC の向上が期待できるが、これらの複雑な機能を成立させるにはハードウェアの負荷の増加や制御ロジックの複雑さの増加を伴う。このため本研究では、エンジン性能最適制御と燃料消費量低減のための制御機能を備え、かつそれらを高度に処理できる分散制御システムを研究開発した。

本稿では、SFC 向上を実現できる制御システムとして燃料消費量低減に有効な制御機能を含んだ分散制御システムを紹介するとともに、本システムは SFC 向上の目標値である 2.5% を達成できることをシミュレーション結果で紹介する。

### 2. SFC 向上のための制御機能

SFC 向上を目的とする制御機能は今までさまざまなシステムが提案されているが、本研究は SSC ( Stability Seeking Control : スタビリティシーキング制御 ), TCC ( Turbine tip Clearance Control : タービンチップクリアランス制御 ), SCAC ( Secondary Cooling Airflow Control :

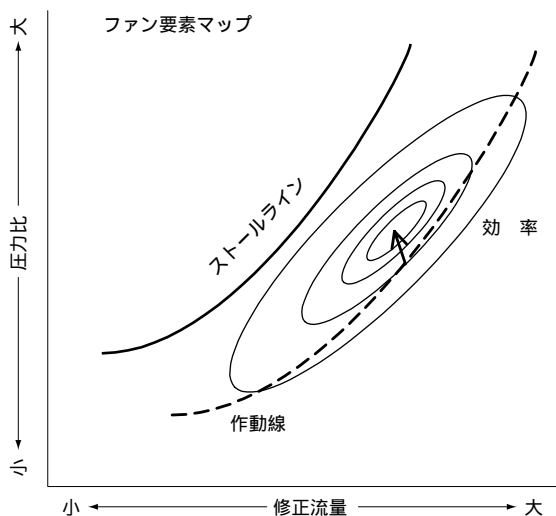
二次冷却空気流量制御 ) および PSC ( Performance Seeking Control : エンジン性能最適制御 ) に着目して行った .

SSC は最悪状況下でもストールが発生しないように安定性を保つ設計が行われたファンおよび圧縮機で, 巡航時などのエンジン入口状態が良好で過大なストールマーシがある状況下で作動点の取り得る範囲を広げ, 効率が実際に高いポイントへ作動点を移す制御である . スタビリティーシーキング制御の原理を第 1 図に示す .

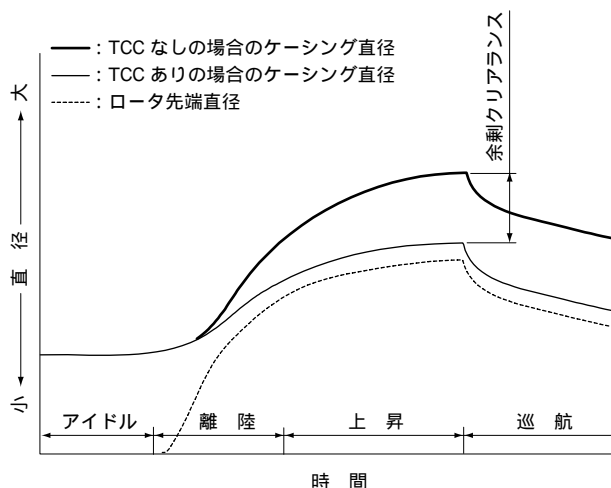
TCC は抽気空気を利用してタービンケースを冷却し, タービンチップクリアランスを小さくしてタービン効率を向上させる制御である . タービンチップクリアランスは設計時に加減速時の熱的变化および機械的变化を考慮してクリアランスの設定を行うため, 過渡変化のない巡航状態においてはタービンチップクリアランスが過大傾向にあり, タービン効率低下の要因となっている . タービンチップクリアランスの変化を第 2 図に示す .

SCAC はタービン翼温度が制限値に対し十分マーシがあるときに, 過剰な二次冷却空気を削減して SFC を向上させる制御である . ただし, 亜音速機用エンジンの場合は離陸時に翼温度が最高点に達するが, これに対し, 超音速機用エンジンの場合は超音速巡航状態で翼温度が最高点となる . このため, 超音速巡航以外の範囲で SCAC を使用し SFC の向上を図る . 二次冷却空気流量制御の概念図を第 3 図に示す .

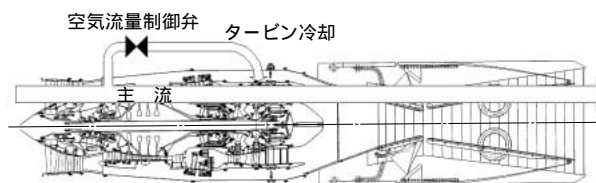
PSC は ECU ( Electronic Control Unit : 電子制御装置 ) 内にあるオンラインエンジンモデルで SFC が最良となる条件を計算し, その結果を制御へ適用する機能である .



第 1 図 スタビリティーシーキング制御の原理  
Fig. 1 Principle of stability seeking control



第 2 図 タービンチップクリアランスの変化  
Fig. 2 Turbine tip clearance trend



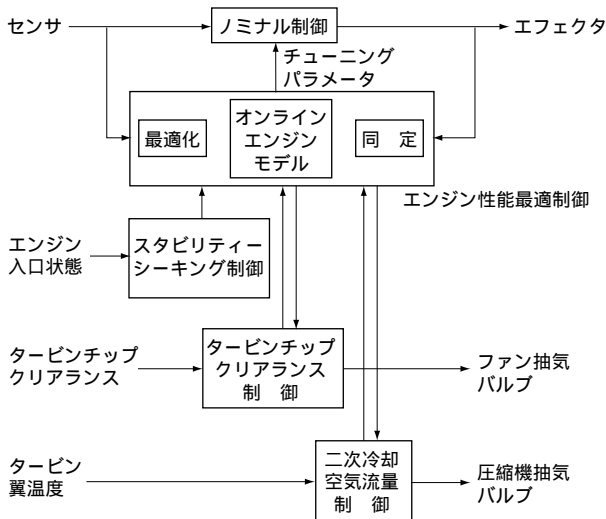
第 3 図 二次冷却空気流量制御の概念図  
Fig. 3 Concept of secondary cooling airflow control

この機能によってエンジン個々の性能差あるいは運用による特性変化がある場合でも, つねにエンジンを最適な状態に保つことが可能となる . なお, 今まで述べた制御機能は組み合わせて用いた場合, お互いの制御機能に相互干渉があるため, 本研究では通常の制御変数に加え SSC, TCC および SCAC の制御変数を追加して最適化を行った . エンジン性能最適制御および制御システム概念図を第 4 図に示す .

### 3. 制御システム設計

2 章で述べた制御機能によって SFC を向上させるには制御システムおよび制御ロジックが非常に複雑になり, 制御演算処理量が増加する . よって, 増加した演算処理量を分散でき, 複雑な制御システムを簡素化できる分散制御システムの採用が必要不可欠となる . 本研究では, 入出力機能および SFC 向上のために新たに追加する制御機能を分散する構成とし, 既存の制御機能をもつノミナル制御装置, 入出力処理機能をもつ入出力処理装置および SFC 向上の制御機能をもつ先進制御装置の 3 台に分散された分散制御評価装置を設計した .

分散制御評価装置および制御対象のブロック図を示した



第 4 図 エンジン性能最適制御および制御システム概念図  
Fig. 4 Concept of performance seeking control and control system

分散制御システムブロック図を第 5 図に示す。図中の白抜き太い矢印は制御装置間で光データバス MIL-STD-1773 で授受されるデータである。

ノミナル制御装置 (Nominal control unit) 内には、通常の推力要求より計算される燃料コントローラのほか、CVSV (Compressor Variable Stator Vane : 圧縮機可変静翼) コントローラおよび排気ノズル面積 A8 コントローラが置かれる。

入出力処理装置 (I/O processing unit) 内には、エンジンセンサおよびエフェクタフィードバックセンサの処理、

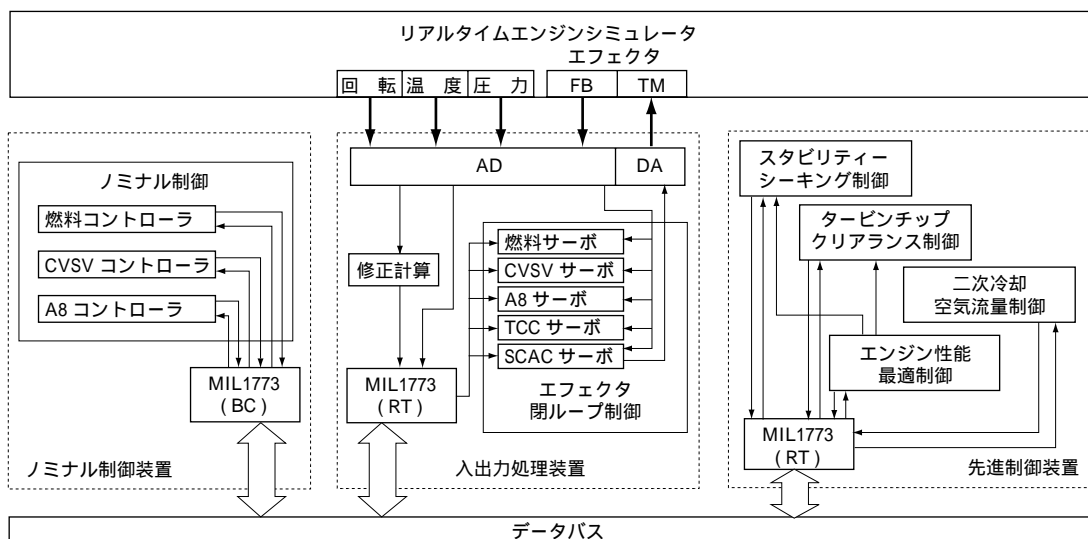
エフェクタトルクモータ電流ドライバが置かれる。また、各エフェクタの閉ループコントローラも本装置に含まれる。

先進制御装置 (Advanced control unit) 内には、SFC 向上のための制御機能が置かれる。エンジン性能最適制御では、特定のエンジン特性を同定し、さらに同定したエンジンモデルを用いて SFC が最小となる最適化パラメータを計算する。スタビリティシーキング制御では、ストールマージンの削減制限値に対する排気ノズル面積および圧縮機可変静翼角度の変化量を求め、これにエンジン性能最適制御結果を加味した値を出力とする。タービンチップクリアランス制御では、修正回転数に対する冷却空気流量のベース値を求め、これにエンジン性能最適制御結果を加味した値を出力とする。二次冷却空気流量制御では、修正回転数および飛行条件に対するタービン翼温度目標値を設定し、これに対する指令冷却空気流量を出力する。

#### 4. 制御システム評価

今回提案した制御システムによる SFC 向上機能を、エンジンシミュレータを制御対象とした閉ループシミュレーション試験で評価した。第 5 図に試験のシステム構成を示す。

試験条件は超音速巡航で機速がマッハ数 2.2、高度が 16 600 m (54 500 ft) のときの結果を示す。なお、超音速では翼温度が最高点であり、これ以上冷却空気流量を削減できないため二次冷却空気流量制御は適用しない設定とした。また、制御開始ポイントはノミナル制御系が制御する



(注) FB : エフェクタフィードバック値, TM : エフェクタトルクモータ電流  
MIL1773 (BC) : MIL-STD-1773 光データバス バスコントローラ  
MIL1773 (RT) : MIL-STD-1773 光データバス リモートターミナル

第 5 図 分散制御システムブロック図  
Fig. 5 Distributed control system block diagram

作動点とした。

超音速巡航時の SFC 最適化結果を第 6 図に、各要素効率最適化結果を第 7 図に示す。両グラフとも最適化開始時の各値を 1.0 とした場合の数値を示し、横軸は最適化回数を示す。

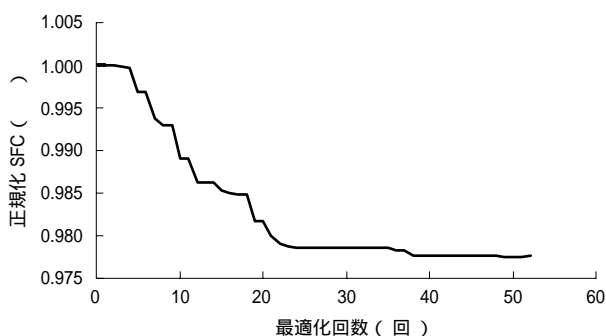
第 6 図から制御演算（最適化処理）が進むにつれて SFC も向上しており、最終的に 2.23% の SFC が向上していることが分かる。SFC が改善している要因は、第 7 図からファン効率およびタービン効率の向上によるところが大きい。ファン効率については、排気ノズル面積を絞り、ファンストールマーzinの余剰分を減少させ、ファンの作動点を高効率側へ移動させたためである。タービン効率の向上は、タービンチップクリアランス制御でクリアランスを減少させたためである。

次に亜音速巡航において、機速をマッハ数 0.95、高度を 10 700 m ( 35 000 ft ) とし、前述 2 章の制御機能をすべて適用とした。制御開始ポイントはノミナル制御系が制御する作動点とした。第 8 図に亜音速巡航時の SFC 最適化結果

を示す。制御演算（最適化処理）が進むにつれて SFC が向上しており、最終的に 7.61% の SFC が向上していることが分かる。

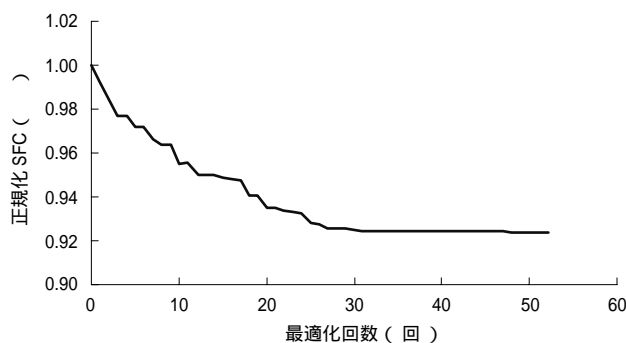
想定ミッションプロフィールでの超音速領域対亜音速領域の燃料消費重量割合は、超音速：亜音速 = 1 : 0.14 の比となる<sup>(3)</sup>。よって、超音速領域および亜音速領域を合わせた SFC の向上率は 2.89% となる。

最後に運用によるエンジン特性変化に対する本制御システムの有効性について示す。1 500 サイクル運用したときの特性変化を想定したエンジン（シミュレータ）に対して本制御システムを適用した。このエンジン特性変化ありの場合の超音速巡航時 SFC 最適化結果を第 9 図に示す。制御演算（最適化処理）が進むにつれて SFC が向上しており、最終的に向上率が 2.3% へ達している。以上のシミュレーションによる確認結果から、運用によって特性が変化したエンジンに対しても本制御システムが有効である。



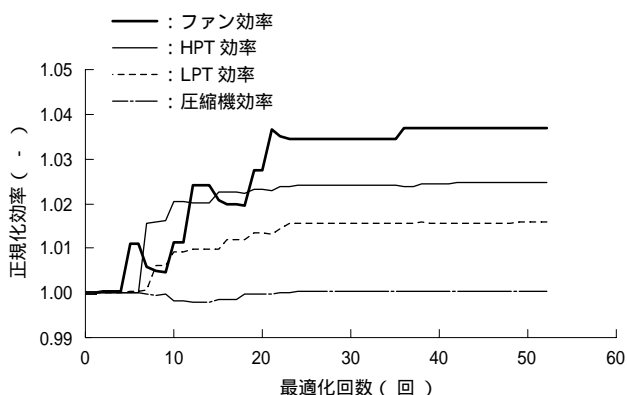
第 6 図 超音速巡航時の SFC 最適化結果

Fig. 6 History of specific fuel consumption optimization at supersonic cruise condition



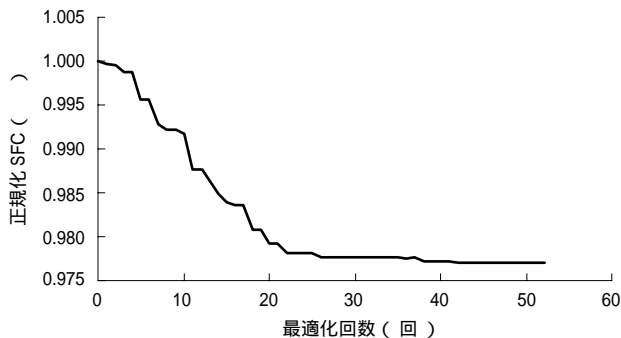
第 8 図 亜音速巡航時の SFC 最適化結果

Fig. 8 History of specific fuel consumption optimization at subsonic cruise condition



第 7 図 超音速巡航時の各要素効率最適化結果

Fig. 7 History of component efficiency optimization at supersonic cruise condition



第 9 図 エンジン特性変化ありの場合の超音速巡航時 SFC 最適化結果

Fig. 9 History of specific fuel consumption optimization at supersonic cruise condition with engine characteristic changes

## 5. 結 言

SFC 向上を達成できる制御システムとして、燃費低減に有効なエンジン性能最適制御などを含むシステムを構築した。また、制御機能の追加による制御演算処理量増加および制御システムの複雑化に対しては分散制御システムを適用するシステムを述べた。そして、エンジンシミュレータを制御対象とした閉ループシミュレーション試験を実施し、SFC が 2.89%向上する結果を得た。以上の結果から本稿で述べた制御機能および分散制御システムは、SFC 向上に対し有効であることを確認した。

## 謝 辞

本研究は、経済産業省の新規産業創出型産業科学技術研究開発制度による「環境適合型次世代超音速推進システム

の研究開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施したものである。本研究の実施に当たり、ご指導とご協力をいただいた NEDO および関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) J. A. Ralph : Advanced Control for Airbreathing Engines Vol.1 NASA CR-189203 (1993.7)
- (2) I. Bansal : Advanced Control for Airbreathing Engines Vol.2 NASA CR-189204 (1993.7)
- (3) 小林健児, 満岡次郎ほか: 目標エンジン・スタディとまとめ 第 2 回環境適合型次世代超音速推進システム (ESPR) シンポジウム予稿集 2004 年 6 月 pp.1 - 6