

# 円筒型リニアモータを用いた 航空機向け電動アクチュエータの開発

佐藤 浩介

## 1 はじめに

民間航空機では、燃費<sup>1)</sup>と整備性<sup>2)</sup>の向上をねらいに、欧米を中心に航空機の電動化が積極的に進められている。機体内の2次エネルギーはこれまでの空圧力、油圧力、電力、回転力の4形態から電力の1形態に集約されており<sup>3)</sup>、機体の各アクチュエータにおいては電力という「共通言語」のもとで機体全体の最適化が図られようとしている<sup>4)</sup>。

ところが、電動アクチュエータのボールスクリュに起因するジャミング<sup>注1)</sup>が障害となり<sup>5)</sup>、機体運用に重大な影響を及ぼす脚系統、操縦系統などでは、ジャミングの懸念がない油圧アクチュエータが使用されている。

ジャミング対策として島津製作所(株)殿のクラッチ構造を備えた電動アクチュエータ<sup>6)</sup>、Messier-Bugatti社殿の2重スライド構造を備えた電動アクチュエータ<sup>7)</sup>などが考案されているが、コンパクトでシンプルな構成とは言い難い<sup>8)</sup>。

本開発では、ジャミングの原因となるボールスクリュを廃した円筒型リニアモータに着目し、油圧アクチュエータと置き換え可能で、剛性と耐コンタミ性を有するストラット構造を試作する。更に、推力脈動と磁束密度の飽和を抑制しつつ、質量推力密度が大幅に向上できる円筒型リニアモータの磁気回路を検討する。

円筒型リニアモータの高剛性化、高推力化などが実現できれば、ジャミングが理由でこれまで適用が困難であった脚系統、操縦系統などに電動アクチュエータを展開でき、民間航空機の電動化に寄与できる。

注1) ボールスクリュ、減速機などの噛み込み現象で、冗長系を構成する航空機用途では特に障害となる。

## 2 円筒型リニアモータ

円筒型リニアモータは1990年代に特許が出願されており<sup>9)</sup>、2003年頃から本格的に市場投入されてい

る。近年では大手電機メーカーの参入などもあり、新しい形式のリニアモータとして民生品市場にて拡大傾向にある<sup>10)</sup>。

### 2.1 作動原理

円筒型リニアモータの作動原理を図1に示す。円筒型リニアモータはリング状巻線が装着されたモータケースと永久磁石が挿入されたシャフトから構成される。同極同士が対面する永久磁石の配置によりシャフトのラジアル方向に磁束が形成される。その磁束と鎖交するリング状巻線に電流を流すと、フレミングの左手の法則に従いシャフトのアキシャル方向に推力が発生する。

永久磁石による磁束密度を $B$ 、巻線長さを $L$ 、電流を $I$ とすると、円筒型リニアモータの発生推力 $F$ は(1)式で与えられる。後述する質量推力密度の向上は(1)式の $B$ 、 $I$ の増加に相当する。

$$F = BLI \quad (1)$$

図1に示すように円筒型リニアモータは、モータケースとシャフト間にエアギャップを有しているため、摺動部を持たない。したがって、同モータ自身にジャミング発生リスクは存在しない。

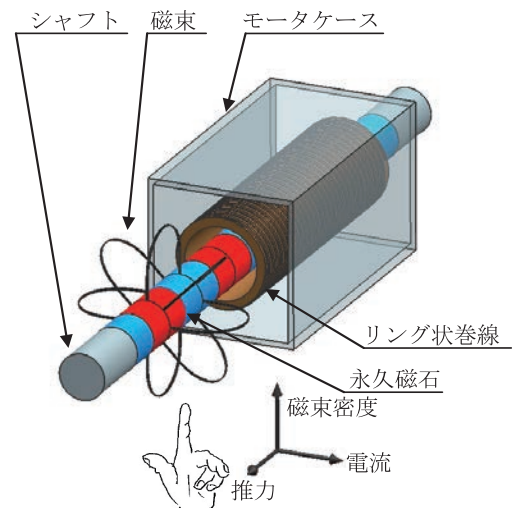


図1 円筒型リニアモータの作動原理

## 2.2 市販品の評価

円筒型リニアモータが油圧アクチュエータと置き換え可能な作動特性を有しているかを確認するために、同モータの市販品を評価する。

評価対象とする市販品の仕様を表1に、試験セットアップを図2に示す。シャフトはリニアブッシュにより両側を直接ガイドされ、推力は可動質量3.529kgと加速度センサ信号との積で、速度はポテンシオメータ信号の微分で算出される。

周波数6Hz、振幅±7cmの正弦波水平加振から求められた推力-速度特性を図3に示す。I、III象限が油圧アクチュエータのメータイン作動に、II、IV象限がメータアウト作動に相当し、円筒型リニアモータは油圧アクチュエータと同様にメータイン、メータアウト作動が可能である。

同市販品を使って、定格電流近傍で100時間のランダム波水平加振を実施した。試験前後のシャフトの表面粗さと円筒度を測定し、その結果を表2に示す。円筒度の試験前後の差異からシャフトの永久変形が認められ、今後、推力を向上させていくという観点からシャフトの直接ガイド方式は適切でない判断する。

また、シャフト内には強力な永久磁石が挿入されているため(図1)、鉄粉などの磁性体がシャフト表面に付着すると容易に除去できず、航空機への搭載を考えると耐コンタミ性が懸念される。

シャフトガイド方式(剛性の確保)と耐コンタミ性について次章にて検討する。

表1 市販品の仕様

シャフト	φ25mm×L600mm, 2.4kg
モータケース	□52mm×L254mm, 2.0kg
ストローク	245mm
最大推力	532N
定格電流	1.2Arms
最大電流	5.6Arms

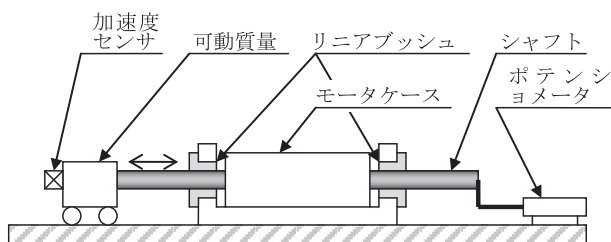


図2 市販品の試験セットアップ

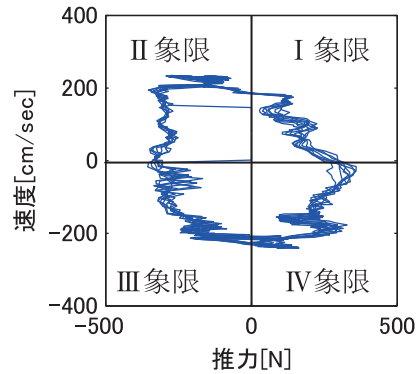


図3 市販品の推力-速度特性(実測)

表2 シャフトの状態確認

	試験前	試験後
円筒度	0.142mm	0.264mm
表面粗さ(Ra)	0.33	0.31

## 3 ストラット構造

剛性の確保と耐コンタミ性の改善を目的に、円筒型リニアモータのストラット構造を試作する。なお、使用するモータは先の市販品と同仕様の巻線、永久磁石で、形状のみを四角形断面から円形断面へカスタマイズされた市販カスタム品である。

### 3.1 質量推力密度

試作したストラット構造を図4に示す。上が最縮状態、下が最伸状態で、モータ部分は可動子であるシャフト⑤と固定子であるモータケース③である(図4のハッチング部分)。

外径φ104mm、最縮長581mm、質量9.5kg(ストラット構造4.3kg、モータ5.2kg)、最大推力532Nで、質量推力密度は56N/kgとなる。後述するように、この値は油圧アクチュエータと比較すると非常に小さな値である。

### 3.2 剛性の確保

図4で、モータ可動子のシャフト⑤はスリーブ⑨とストッパ⑬で両端支持され、モータ固定子のモータケース③はハウジング①に片持ち固定されている。モータに通電すると、モータケース③とシャフト⑤の間にアキシャル方向の推力が発生し、可動側のスリーブ⑨と固定側のガイド⑦がウェアリング⑧⑩を介して摺動作用する。その結果、ストラットとしての剛性はモータのシャフト⑤ではなく、ウェアリング⑧⑩を介してスリーブ⑨とガイド⑦で保たれる。

### 3.3 耐コンタミ性

本ストラットは、外部から鉄粉などのコンタミが侵入しにくいよう伸縮作動時にエアの吸排気を伴わ

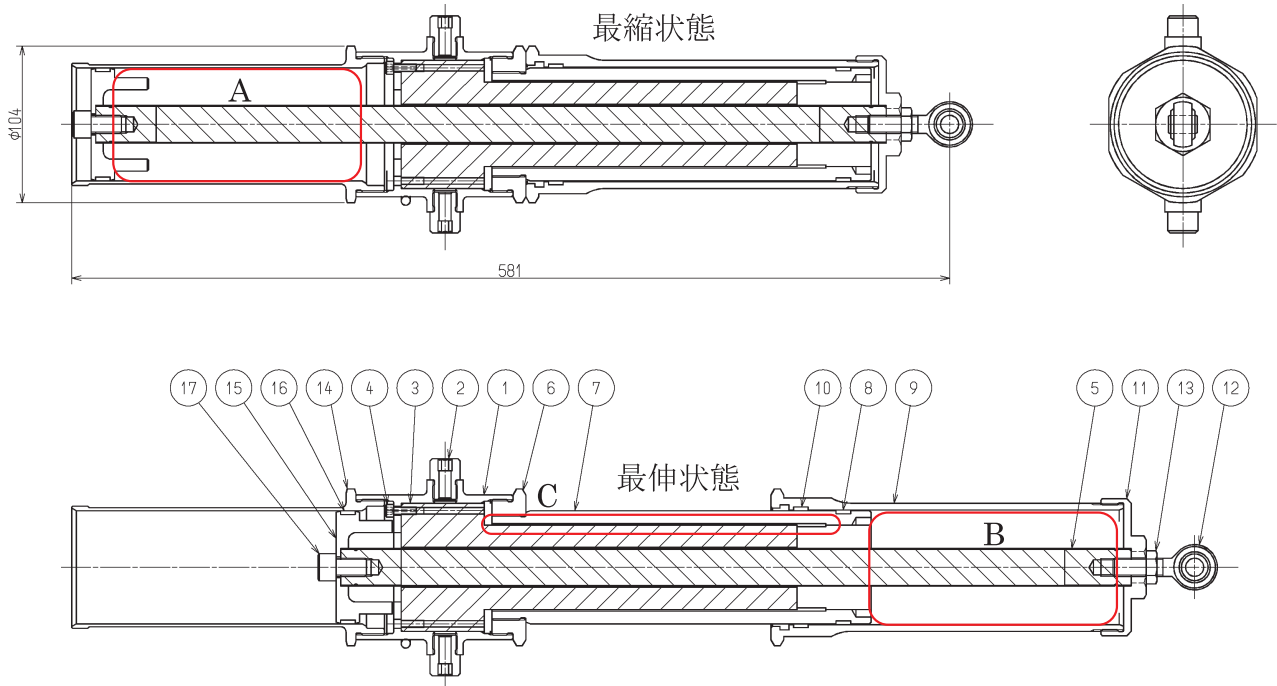


図4 円筒型リニアモータのストラット構造

ない密閉構造としている。

具体的には、ガイド⑦の外径とボトムガイド⑭の内径を一致させることにより、モータケース③で区切られる両端のキャビティ容積（図4のA、B部）が等しくでき、その結果、伸縮作動時にエアの吸排気を伴わない。また、両端キャビティ間におけるエア移動時の通過圧損を低減するために、ガイド⑦の内周に貫通路（図4のC部）が4ヶ所設けられている。

### 3.4 耐久試験

定格電流近傍で、500時間の耐久試験を実施した。試験条件は負荷質量12.34kg、振幅±6.9cm、周波数0.92Hz、正弦波水平加振である。

試験のセットアップ状況を写真1に、試験開始時、終了時の時間応答を図5に示す。試験開始時と終了時で時間応答に変化はなく、異常は認められなかった。

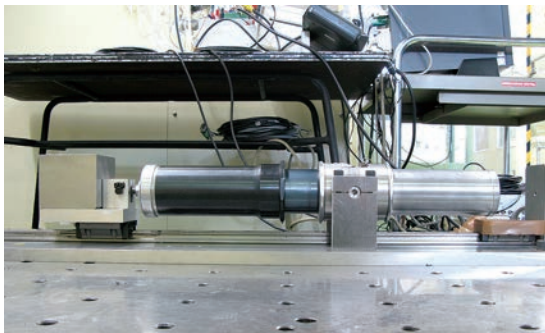
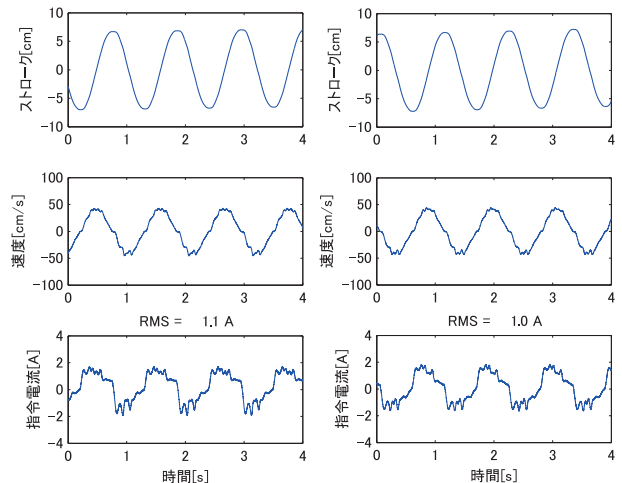


写真1 試作品の試験セットアップ状況



試験開始時 試験終了時

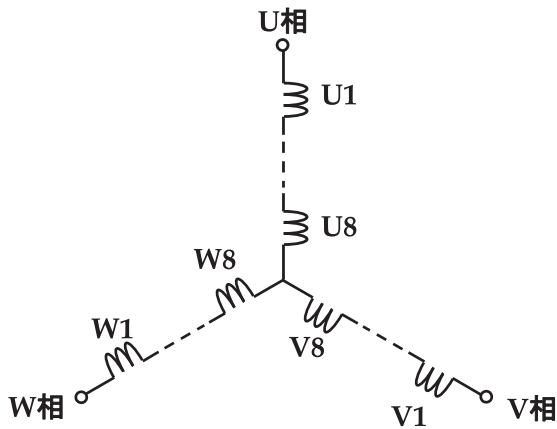
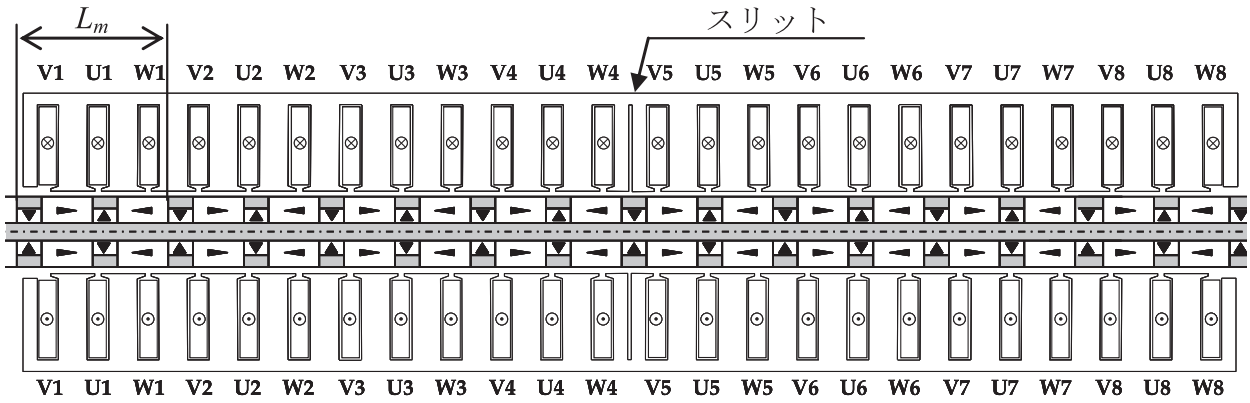
図5 試作品の時間応答（実測）

## 4 質量推力密度の向上

有限要素非線形磁場解析を用いて、質量推力密度を向上する円筒型リニアモータの磁気回路を検討する。

### 4.1 磁気回路

検討した円筒型リニアモータの磁気回路を図6に、図4に組み込まれている市販カスタム品との比較を表3に示す。市販カスタム品との主な差異は極数、コア付き構造、最大許容電流で、モータ単体の質量推力密度の向上は4.9倍に達している。



巻線ターン数

番号	U	V	W
1	156		
2	156		
3	169	169	169
4			
5	156		
6			
7	156		
8	156		

図6 円筒型リニアモータの磁気回路

極数の増加（多極化）により機械速度／磁界速度は市販カスタム品の1/1から1/2に変更され、理論的に速度が1/2、推力が2/1となる磁気減速の効果が得られている。コア付き構造は永久磁石の動作点を向上し、リング状巻線に鎖交する磁束を増加するが、副作用としてコギング（用語解説「コギング」p.94参照）を引き起こす。コア付き構造は(1)式のBを増加することに相当する。

電流－推力特性を図7に示す。磁束密度の飽和を抑制するねらいでコア付き構造の形状を最適化した結果、市販カスタム品の2倍である11.2Armsまでほぼリニアな電流－推力特性が得られている。

4.2 推力脈動の抑制

コア付き構造である本磁気回路はコアレス構造の市販品と比較してコギングが増加する。更に、リニアモータ特有の端効果<sup>11)</sup>が存在するため推力脈動が大きい。

コギングはコアと永久磁石の吸引力によって発生する。このコギングを抑制するために回転型モータでは一般にスキュー<sup>注2)</sup>が設けられているが<sup>12)</sup>、本磁気回路ではその代用としてコアの中間にスリットを設けている（図6）。最小構成単位のスロット数を

表3 検討品と市販カスタム品との比較

	検討品	市販カスタム品
モータサイズ	φ60mm×L209mm	φ56mm×L207mm*
質量	5.67kg	5.2kg
極数／スロット数	16極24スロット	8極24スロット
コア構造	あり	なし
最大推力	2841N@11.2Arms	532N@5.6Arms
質量推力密度	501N/kg	102N/kg

\*センサ収納部を除外

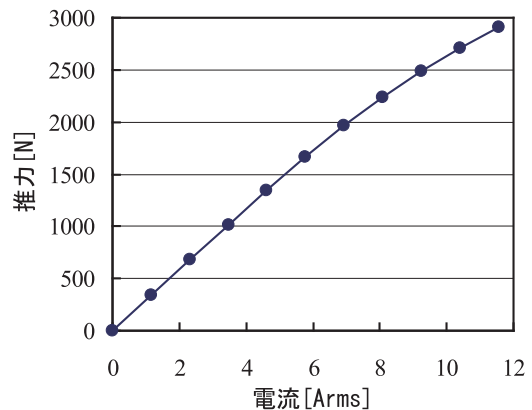


図7 検討品の電流－推力特性（解析）



$Z_1 (= 3)$ , 最小構成単位の永久磁石数を $Z_2 (= 2)$ , 最小構成単位の永久磁石数の長さを $L_m$ (図6), 脈動次数を $n$ とすると, スリット幅 $W$ は(2)式で与えられる. リニアモータでは $Z_1$ と $Z_2$ の最小公倍数の倍数次の推力脈動が存在し,  $n$ は最も脈動振幅の大きい次数を表す. 次数 $n$ は有限要素非線形磁場解析で決定される.

$$W = \frac{L_m}{(Z_1 \text{と} Z_2 \text{の最小公倍数}) \times 2n} \quad (2)$$

リニアモータでは磁気回路の両端が切れているために端効果が発生する. 図6の巻線配置ではU相のみが両端に接していないため, 同一巻線ターン数のもとでは永久磁石の磁束鎖交数が他相より多くなる. これは, 巻線電流通電時の推力バランスを崩し, コギングとは別に推力脈動を引き起こす原因となる. この端効果に起因する推力脈動を抑制するために, U相巻線ターン数を $V, W$ 相のそれらより少なく設定し(図6), U, V, W相電流によって発生する推力をバランスさせている.

本磁気回路の推力脈動を図8に示す. 推力脈動率は各電流値における平均推力で推力脈動のPeak-To-Peak値を除いた値である. 推力脈動率は10~22%に抑制され, コア付き構造のリニアモータとして妥当なレベルと言える.

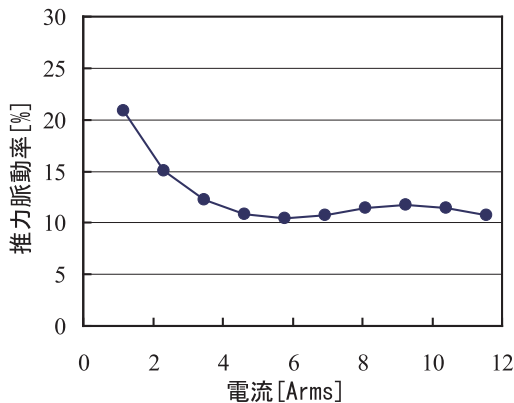


図8 検討品の推力脈動 (解析)

#### 4.3 置き換え可能な質量推力密度

図4のストラット構造に図6の円筒型リニアモータを適用すると, 最大推力が2841N, 質量が9.97kg (ストラット構造4.3kg, モータ5.67kg) となり, 質量推力密度は284N/kgと見込まれる.

質量30kg以下の航空機向け油圧アクチュエータの質量推力密度は約6000N/kgで<sup>13)</sup>, あらためてその軽さが認識される. 航空機の電動化において, 既存システムとの置き換えラインは単位質量あたりの性能指標が既存の1/10以上と予想される<sup>14) 15)</sup>. この予想を電動アクチュエータにも適用すると, 油圧ア

クチュエータからの置き換え可能な質量推力密度は600N/kg以上で, 見込みである284N/kgに対して更に質量推力密度を向上する必要がある.

注2) 回転型モータで, コアなどを回転軸に対して斜めに配置すること.

## 5 おわりに

円筒型リニアモータを用いたストラット構造を試作, 更に質量推力密度を向上する磁気回路を解析検討し, 次の知見を得た.

- (1)モータのシャフトとは別に摺動機構を設け, ストラットとしての剛性を確保した.
- (2)伸縮作動に対して内部容積を不変化することによりシャフトの密閉構造を実現し, シャフトの耐コンタミ性を向上した.
- (3)推力脈動と磁束密度の飽和を抑制しつつ, 市販カスタム品に対して質量推力密度が4.9倍となる磁気回路を得た.
- (4)油圧アクチュエータとの置き換えには質量推力密度600N/kg以上が必要で, 更に電動アクチュエータの質量推力密度の向上が必要である.

本開発を実施するにあたり, 磁気回路について有益な検討をしていただいた豊田工業高等専門学校情報工学科加納善明准教授に厚く御礼申し上げます.

### 参考文献

- 1) Boeing社のホームページ: 787 Dreamliner Program Fact Sheet, <http://www.boeing.com/boeing/commercial/787family/programfacts.page?>
- 2) Michel Todeschi: Airbus-EMAs for flight controls actuation system 2012 status and perspectives, Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, Proceedings, June 13-14, 2012
- 3) J.A. Rosero, J.A. Ortega, E. Aldabas, L. Romeral: Moving Towards a More Electric Aircraft, IEEE A&E SYSTEM MAGAZINE, March 2007
- 4) Joseph Huysseune, Oliver Hiernaux: Evolution of Equipment and Sub-Systems for the Future Green Aircraft, 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, September 2008
- 5) Dominique van den Bossche: THE A380 FLIGHT CONTROL ELECTROHYDROSTATIC ACTUATORS, ACHIEVEMENTS AND LESSONS LEARNT, 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, September 2006
- 6) 株式会社津製作所: 電動アクチュエータ, 公開特許公報, 特開2008-8470, 2008年1月17日

- 7) メシエーブガッティ：アクチュエータ及びこれを使用するための方法，公開特許公報，特開2007-170668，2007年7月5日
- 8) David Blanding: SUBSYSTEM DESIGN AND INTEGRATION FOR THE MORE ELECTRIC AIRCRAFT, Collection of Technical Papers, 5th International Energy Conversion Engineering Conference Vol. 2, p1068-1075, 2007
- 9) 石山里丘：サーボモータ，公開特許公報，特開平7-107706，1995年4月21日
- 10) リニアモータシステム2008—市場動向調査報告書，(有)データ技術研究所，2008年8月11日
- 11) 森田郁朗：Halbach形磁石配置円筒形リニアモータの推力特性解析，電気学会研究会資料集，LD-10-38，p31-36，2010年8月5日
- 12) 見城尚志，永守重信：新・ブラシレスモータ，総合電子出版社，2005年1月15日
- 13) Amine Fraj, Marc Budinger, Toufic El Halabi, Jean-Charles Mare: Modelling approaches for the simulation-based preliminary design and optimization of electromechanical and hydraulic actuation systems, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 23-26 April 2012
- 14) 谷泰寛，土井彰，麻生茂，橋本潤一郎：Morphing技術を応用した電動小型航空機について，第48回飛行機シンポジウム講演集，p720-726，2010年11月30日～12月2日
- 15) Imon Chakraborty, David Trawick, David Jackson, Dimitri N. Mavris: Electric Control Surface Actuator Design Optimization and Allocation for the More Electric Aircraft, 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference August 12-14, 2013

— 著 者 —



佐藤 浩介

1984年入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部技術統轄部航空技術部第二設計室。航空機用装備品の設計，開発に従事。