

# 品質工学を活用した円筒型リニアモータの パラメータ設計

永 溝 喜 也

## 1 はじめに

民間航空機では欧米を中心にエンジンや装備品の電動化が積極的に進められており、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形態に集約する傾向がある。しかし、機体運用に重大な影響を及ぼす脚系統、操縦系統では現在も油圧アクチュエータが使用されている。その理由の一つとしてボールスクリーを用いた電動アクチュエータではジャミング<sup>注1)</sup>が発生することが挙げられる。ジャミング対策として(株)島津製作所殿のクラッチ構造を備えた電動アクチュエータ<sup>1)</sup>、Messier-Bugatti殿の2重スライド構造を備えた電動アクチュエータ<sup>2)</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。そこでKYBではジャミングの原因となるボールスクリーを使用しない円筒型リニアモータに着目し、油圧アクチュエータに置き換え可能で剛性と耐コンタミ性を有する円筒型リニアモータの開発を行っている<sup>3)</sup>。

円筒型リニアモータは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も見られ、新しい形式のリニアモータとして民生品市場で拡大傾向にある<sup>3)</sup>。

次に、円筒型リニアモータの作動原理を説明する。円筒型リニアモータはリング状巻線（以下コイルと言う）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。永久磁石で形成される磁束はN極からシャフトのラジアル方向に流出し、S極に流入する。その磁束と鎖交するコイルに電流を流すと、フレミングの左手の法則に従いシャフトの軸方向に推力が発生する（図1）<sup>3)</sup>。

KYBでは円筒型リニアモータに関する知見や解析技術が不十分なため、推力特性と磁路形状の関係が不明確な部分が多い。今後、円筒型リニアモータの仕様を満足するような磁気回路設計を進めていく場合、推力特性と磁路形状の関係を適切に把握して

おくことが望ましい。

そこで本報では、円筒型リニアモータの推力特性を予測する磁場解析プログラムを開発し、品質工学を活用したパラメータ設計を実施することで、推力特性と磁路形状の関係性を把握した。

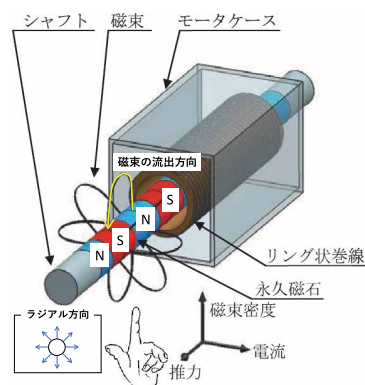


図1 円筒型リニアモータ<sup>3)</sup>

なお、本報で用いる円筒型リニアモータの基本構造は、電動リニアアクチュエータの推力密度向上に関する研究で協力いただいた大同大学加納善明准教授が考案されたもので、最終的な構造設計はKYBで実施し実現化した。

注1) ボールスクリー、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 推力特性予測プログラムの開発

### 2.1 解析対象

本プログラムの解析対象は電動リニアアクチュエータの磁路形状に影響する円筒型リニアモータ部とした。図2に円筒型リニアモータの内部概要を示す。

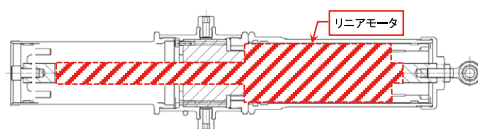


図2 円筒型リニアモータの内部概要

## 2.2 解析モデル

円筒型リニアモータの磁場解析モデルを、汎用有限要素法解析プログラムのスクリプト言語を用いて作成した。図3に解析モデルを示す。

解析モデルは2次元軸対称モデルで作成し簡略化するとともに、メッシュは磁気特性の影響に合わせて適正化することで計算時間の短縮を図った。

開発したプログラムはコイルに通電する電流値と寸法値を入力することで、任意のストローク刻みごとに静磁場解析を行い、各ストローク位置における推力を計算する。その推力計算をシャフトが1ピッチ分移動するまで繰り返す仕組みとなっている。

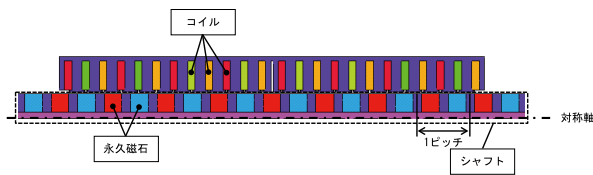


図3 円筒型リニアモータ解析モデル

## 2.3 試験結果との比較

開発したプログラムの妥当性を確認するため、試験結果との比較を行った。図4に1ピッチあたりのストローク-推力特性（以下St-F特性と言う）、図5に電流-1ピッチ間の平均推力特性（以下I-F特性と言う）の比較結果をそれぞれ示す。比較した結果、解析結果と試験結果は良好に一致しており、今回開発したプログラムの解析精度は問題ないことが確認できた。

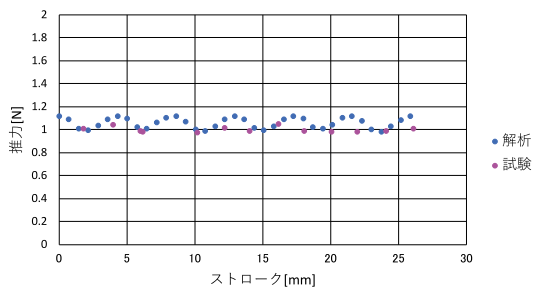


図4 St-F特性比較結果  
(試験の平均推力を1とした場合)

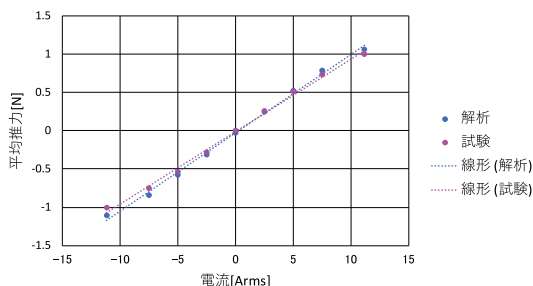


図5 I-F特性比較結果  
(電流11.2Armsの試験平均推力を1とした場合)

## 3 品質工学を活用したパラメータ設計

パラメータ設計は品質工学の手法の1つで、設計パラメータである制御因子を最適化することで、ばらつきの原因となる誤差因子の影響を受けにくい最も安定する出力条件を実現する手法である。誤差因子に対する安定性を評価する尺度としてSN比、出力の平均値を評価する尺度として感度を用いる。

近年、製品開発を効率良く実施するために開発そのものを机上段階で実現するモデルベース開発（以下MBDと言う）の重要性が高まっており、MBDを適用し様々な条件下でロバスト性の高い製品開発を行うためにも品質工学の活用は有効な手段と言える<sup>4)</sup>。

今回適用したパラメータ設計手順を図6に示す。対象は2.1節で説明した円筒型リニアモータとし、図6に示す(1)~(9)のステップでパラメータ設計を行い、推力特性と磁路形状の関係性の把握を試みた。以下にステップごとの手法の説明を示す。

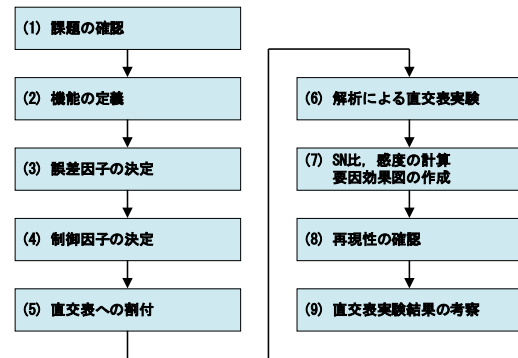


図6 パラメータ設計手順

### 3.1 課題の確認

初めに対象製品の課題の確認を行った。今回、円筒型リニアモータの推力特性と形状寸法の関係が不明確という課題がある。そのため、不明確のまま磁気回路設計した場合、モータの推力が低下するもしくはシャフトがストロークした際の推力のばらつき（以下推力脈動と言う）が大きくなることが懸念される。また、推力脈動を低減させても推力自体は低下させたくないという制約もある。以上のことから、課題をシャフトがストロークした際の推力脈動の低減、1ピッチの推力が向上するような制御因子を明確にすることとした。

### 3.2 機能の定義

次に、課題を解決するために入力と出力の関係を明確にし、機能を定義した。機能とは製品本来の目的を達成するための働きのことである。本活動における円筒型リニアモータの基本機能を「コイルに通電した電流により磁界

を発生させ推力を出力する」とし、入力はコイルに通電する電流値、出力は1ピッチ間の推力とした。

また、入出力の関係の他に誤差因子と制御因子を設定する必要がある。誤差因子は設計者側で制御できないパラメータであり、制御因子は設計者が自由に変更可能なパラメータである。誤差因子については3.3節、制御因子については3.4節で説明する。図7にシステム図を示す。評価特性は出力が正の一定値の場合に用いる望目特性を用いた。

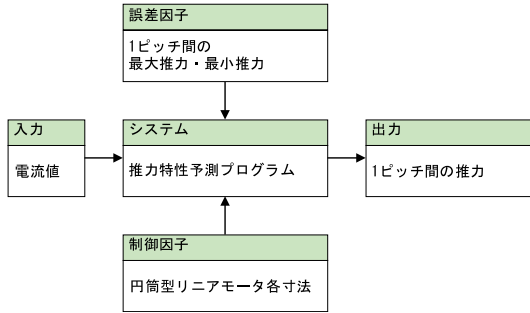


図7 システム図

3.3 誤差因子の決定

本来であれば誤差因子には環境条件や材料の劣化等の市場における様々な要因を取り上げるが、今回の円筒型リニアモータの場合、市場の様々な要因による推力のばらつきよりも推力脈動が大きいことが予想されたため、今回は推力脈動に着目した。

円筒型リニアモータにおいてモータケースとシャフトの相対位置によって磁束の流れやすさは変化し、推力も変化する。つまり、推力脈動は磁束の流れやすさの変化により起こる推力のばらつきと考えることができる。そこで、推力脈動の最大推力・最小推力の2因子を誤差因子として採用した(図8)。

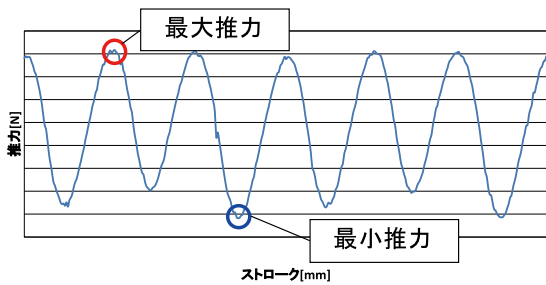


図8 最大推力・最小推力

3.4 制御因子の決定

解析による事前検討から磁路形状に影響を与え、製品として調整可能な円筒型リニアモータの各寸法17因子(因子A~Q)3水準を制御因子に採用した。

3.5 直交表への割付

3.3節、3.4節で選定した誤差因子及び制御因子と信号因子である入力電流を直交表に割付けた。直交表にはL54直交表を使用し、入力電流は最大電流

1水準とした(表1)。以上より、総実験数は54(制御因子)×1(信号因子)の54ケースとなる。

表1 L54直交表

別No.	制御因子																	信号因子	
	因子A~Q																	N1, N2	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	N1	N2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
5	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
6	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
8	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	2	2
10	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	1	2	2
11	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	2	2	2
12	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	2	1	2	2
13	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2
14	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	3	3
15	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
16	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
17	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	3	2	2
18	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	2	1	3	3
19	3	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	2	2	2
20	3	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	2	2	2	2
21	3	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	2	3	2	2
22	3	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	2	3	2	2
23	3	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	3	3
24	3	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
25	3	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
26	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
27	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	2	3	3
28	1	1	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2
29	1	1	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2
30	1	1	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2
31	1	2	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
32	1	2	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
33	1	2	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
34	1	3	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	1	3
35	1	3	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	2	2
36	1	3	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	2	2
37	2	1	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	1	3
38	2	1	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	1	3
39	2	1	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2	2	1	1	3
40	2	2	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
41	2	2	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
42	2	3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2
43	2	3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2
44	2	3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2
45	2	3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2
46	3	1	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
47	3	1	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
48	3	1	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
49	3	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
50	3	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
51	3	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
52	3	3	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
53	3	3	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3
54	3	3	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3

各実験条件における最大推力・最小推力

3.6 解析による直交表実験

3.5節の直交表に基づき直交表実験を行った。解析は2章で説明した推力特性予測プログラムを用いた。さらに、総実験数54ケースの解析条件の設定及び解析実行の一連の作業を自動で実行するツールを構築し直交表実験を実施した。

3.7 要因効果図の作成

直交表実験結果より要因効果図を作成した。要因効果図とは実験した因子の要因効果をグラフ化したもので、各水準の実験平均値の差分を算出することで水準を変更した際に得られる効果を見ることができる(図9)。

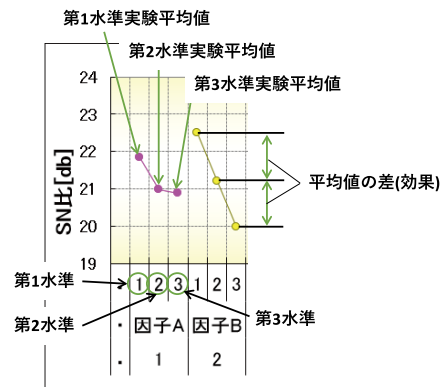


図9 要因効果図の見方

図10にSN比，図11に感度の要因効果図をそれぞれ示す。SN比は推力脈動，感度は推力を表す。今回，現行条件を円筒型リニアモータの図面中央値と定義し，2つの要因効果図から改良案を2案それぞれ決定した。改良案1は推力の向上を重視したもので感度の要因効果図から感度が大きくなる水準を選択し，SN比の要因効果図は無視した案である。改良案2は推力脈動の低減を重視したもので感度を落とさず，かつSN比が大きくなる水準を選択した案である。図10，図11の結果をまとめると以下のことが言える。

- (1) 因子A，因子B，因子NはSN比と感度の傾向が相反する関係にある。その中でも因子BはSN比と感度両方に及ぼす影響は大きい。
- (2) 因子J，因子PはSN比と感度の傾向が両立する関係にあり，今回のパラメータ設計において有効な因子であると言える。
- (3) 因子C，因子D，因子E，因子K，因子LはSN比のみに影響する因子である。その中でも因子KはSN比に及ぼす影響は大きい。
- (4) 採用した因子の中に感度のみに影響する因子はない。

### 3.8 再現性の確認

次に，直交表実験結果の信頼性を確認するため，直交表実験結果からの推定値と現行条件，改良案1，2それぞれの条件で解析し，求めた確認値を比較し再現性の確認を行った。一般に推定値と確認値の利得差が小さければよく，±3db以下であれば再現性があるとされている。表2に改良案1の再現性確認結果，表3に改良案2の再現性確認結果をそれぞれ

表2 改良案1再現性の確認結果

	条件	推定値	確認値
SN比 [db]	改良案1	18.69	19.80
	現行条件	20.50	20.84
	差(利得)	-1.81	-1.05
	差(再現性)	-0.76	
感度 [db]	改良案1	70.86	70.75
	現行条件	68.76	68.86
	差(利得)	2.10	1.89
	差(再現性)	0.21	

表3 改良案2再現性の確認結果

	条件	推定値	確認値
SN比 [db]	改良案2	27.90	25.91
	現行条件	20.50	20.84
	差(利得)	7.39	5.07
	差(再現性)	2.33	
感度 [db]	改良案2	69.00	68.85
	現行条件	68.76	68.86
	差(利得)	0.24	-0.01
	差(再現性)	0.24	

示す。確認した結果，改良案1，改良案2共に利得差は±3db以下となり，利得の再現性は高く，結果は信頼できると考える。

### 3.9 直交表実験結果の考察

図12に現行条件と改良案1，2の最大電流時のSt-F特性比較結果を示す。比較した結果，改良案1は現行条件より推力は向上しているが，推力脈動

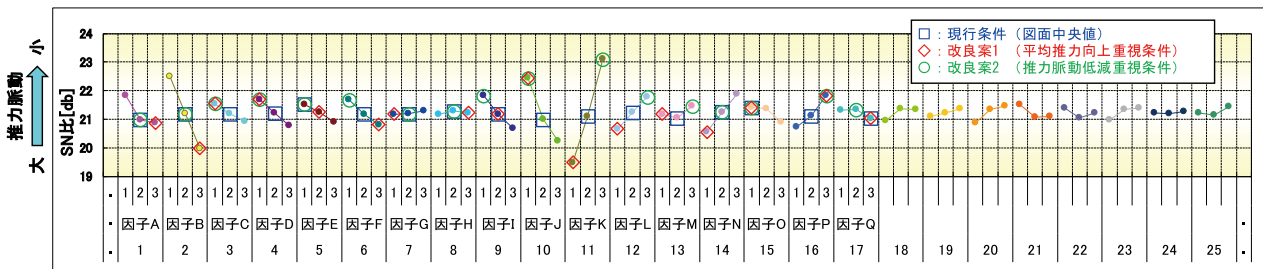


図10 SN比の要因効果図

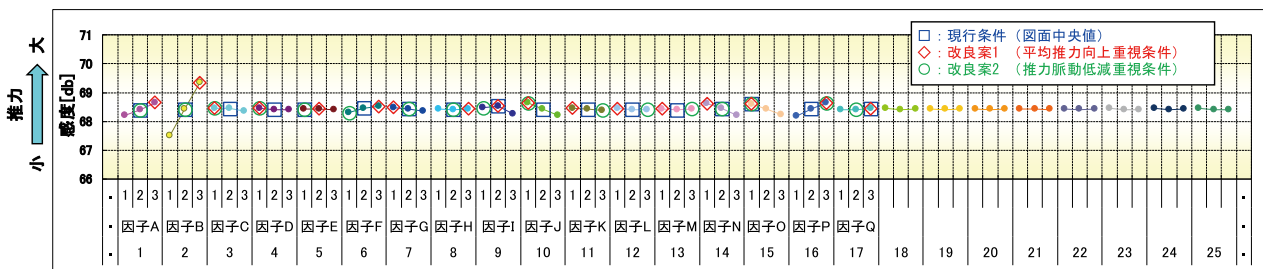


図11 感度の要因効果図



は悪化している。これは3.7節で述べたように因子A、因子B、因子NはSN比と感度の傾向が相反する関係にあることが影響している。改良案1では上3因子の水準は感度が向上する側を選択したことで、SN比は悪化した方に働き推力脈動が悪化したと考えられる。また、因子Kは感度がわずかに向上する水準を選択したが、その水準はSN比が大きく悪化する水準であったことも推力脈動が悪化した要因だと考えられる。次に、改良案2は現行条件と比べて推力は同程度で推力脈動は低減している。こちらは概ね想定通りの結果となった。

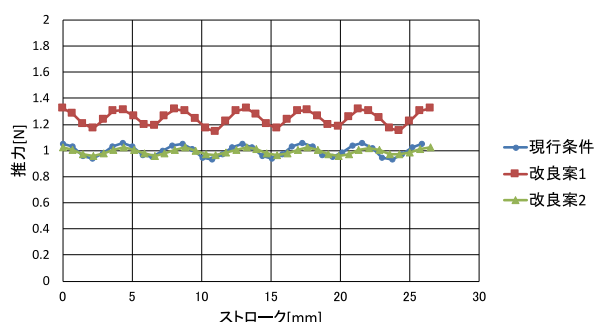


図12 現行条件・改良案のSt-F特性比較結果  
(現行条件の平均推力を1とした場合)

最後に、電動アクチュエータの単位質量あたりの推力を表す推力密度の比較を行った。航空機にとって推力密度は重要な指標であり、アクチュエータとしては小型・軽量で高出力、すなわち高推力密度なものが望ましいとされている。今回実施したパラメータ設計で推力特性と磁路形状の関係性は把握できたが、磁路形状が変わるとリニアモータの質量も変わるため、推力が向上しても推力密度が向上するとは一概に言えない。そのため、推力特性とは別に推力密度で比較する必要がある。図13に現行条件と改良案1、2の推力密度の比較結果を示す。比較した結果、改良案1、2の推力密度は現行条件より向上した。向上した要因を考察したところ、改良案1と2それぞれ異なる要因で推力密度が向上していることが分かった。向上要因は以下の通りである。

- (1)改良案1の場合、推力は現行条件より向上し、副次的な効果としてリニアモータの質量が現行条件より増加したが、推力の向上率が質量の増加率を上回ったため推力密度が向上した。
- (2)改良案2の場合、推力は現行条件と同等だが、副次的な効果としてリニアモータの質量が現行条件より低減したため推力密度が向上した。

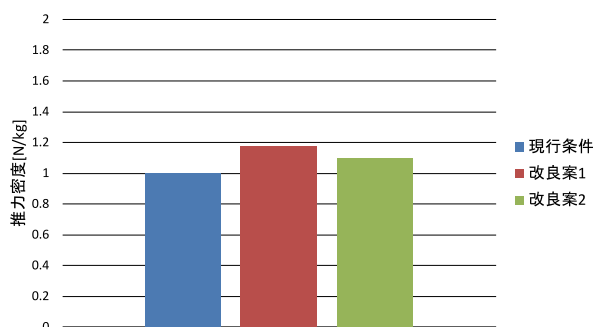


図13 現行条件・改良案の推力密度比較結果  
(現行条件の推力密度を1とした場合)

#### 4 おわりに

円筒型リニアモータの推力特性予測プログラムを開発し、品質工学を活用したパラメータ設計を実施することで、推力特性と磁路形状の関係性を把握することができた。

最後に磁気回路及び磁場解析についてご指導いただいた大同大学加納善明准教授に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 佐藤：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，KYB技報第50号，(2015年4月)。
- 4) 徳光文広：MBDと品質工学の連携による設計諸元と工程の最適化，マツダ技報No. 34，pp. 64-69，(2017年)。

#### 著者



永溝 喜也

2012年入社。技術本部CAE推進部相模分室。各種製品の解析業務に従事。