

磁場解析を活用した比例ソレノイド減衰力調整式 ショックアブソーバの応答性改善

上野和生・松下雄介

1 はじめに

近年、自動車において、操縦安定性と乗り心地を両立するため、セミアクティブサスペンションを搭載した車両が増加しつつある。

セミアクティブサスペンションとは、時々刻々と変化する路面からの入力に対し、リアルタイムで減衰力を制御するシステムのことで、アクティブサスペンション^{注1)}を減衰力調整式ショックアブソーバで近似的に実現しようとするものである。

自動車用減衰力調整式ショックアブソーバの形式としては、制御電流に応じて無段階に減衰力調整できる比例ソレノイドバルブ（以下SOL弁）を搭載した減衰力調整式ショックアブソーバが主流である（図1）¹⁾。

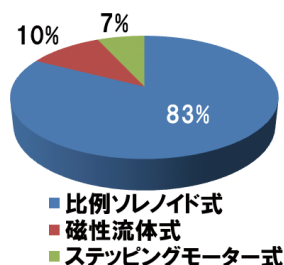


図1 減衰力調整方式の割合（2016年度）

SOL弁の搭載位置としては、ショックアブソーバの内側に設置する内蔵式と、ショックアブソーバの外側に設置する外付け式があり、その割合はショックアブソーバ諸元の成立性が高い外付け式が過半数を占めている¹⁾。

今回報告を行うのは、外付け式SOL弁を用いた減衰力調整式ショックアブソーバ¹⁾（以下、外付け式SOL減調SA）の開発初期の試作品において、減衰力切替え応答性が要求品質に達しなかったために行った応答性改善活動についてである。

本活動において、磁場解析に品質工学（用語解説「品質工学について」p. 60参照）を活用し、実際の使用状況におけるばらつきに対するロバスト性と、減

衰力切替え応答性を同時に改善できる条件を求めた。

注1) パワー源をもち、路面状況に応じた制御機能をもつサスペンション。セミアクティブサスペンションの場合は減衰力を制振方向にのみ働かせることができるが、アクティブサスペンションの場合は加振方向にも働かせることができる。

2 本製品の概要

写真1に製品化した外付け式SOL減調SAの外観を示す。



写真1 外付け式SOL減調SA外観

図2に外付け式SOL減調SAの構造を示す。ショックアブソーバの外側に設置したSOL弁に油を導くためにシリンダ、中間パイプ及びアウトシェルで構成される3重管の構造となっている。伸行程と圧行程を1つのSOL弁で減衰力を調整するために、作動油の流れをユニフロー（一方向流れ）とした。ピストン、ベースバルブはチェック弁になっており、減衰力は主にSOL弁で発生させる。

図3に量産に用いられたSOL弁構造（本活動と基本構造は同じ）を示す。SOL弁は、ソレノイド部と制御バルブ部から成り立っている。ソレノイド部は通電する電流値に応じて変化するソレノイド推力を発生させる。制御バルブ部のメイン弁については、

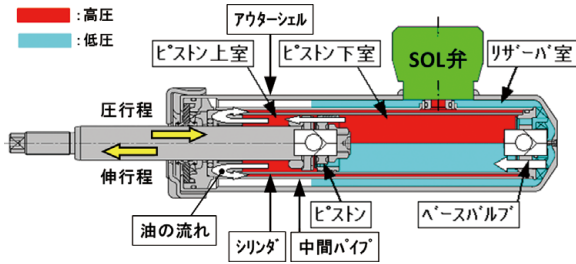


図2 3重管ユニフロー構造

P1, P2及びP3の圧力バランスで積層リーフバルブと可動ディスクの開閉を行なう。このP3は、ソレノイド推力を受けたポペットバルブによってコントロールされる。つまり、電流値を変化させることで、任意の減衰力を発生させる構造になっている。このソレノイド部が、磁場解析を行う対象である。

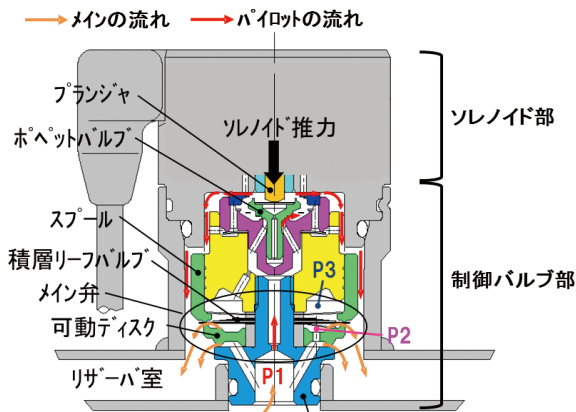


図3 SOL弁構造

図4に減衰力特性の狙いのイメージを示す。セミアクティブサスペンションでは、ショックアブソーバの減衰力可変幅を大きく設定し、その切替え応答性を上げることで、操縦安定性と乗り心地を高次元で両立できると考える。

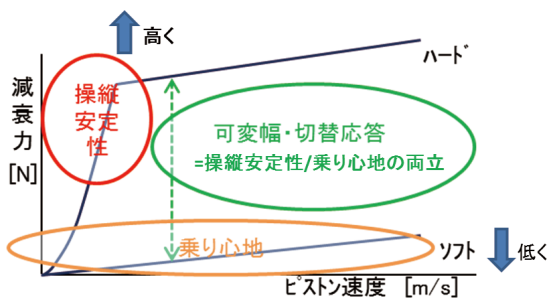


図4 減衰力特性の狙いイメージ

3 減衰力切替え応答性への寄与率

応答性に関する試験結果を分析することによりSA本体(図2におけるSOL弁以外)は、応答性への寄与率は低く、SOL弁の寄与率が高いこと、中でもソレノイドの寄与率が高いことがわかった(図5)。

そこで、ソレノイドの磁場解析により応答性を改善する方法を検討することとした。

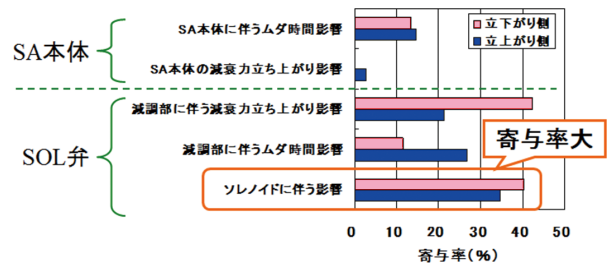


図5 減衰力切替え応答性の寄与率

4 解析モデル

ソレノイドの過渡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。

解析モデルは、パラメトリックに寸法を変更できるように簡略化したモデルとした(図6)。さらに、渦電流及び磁気飽和も考慮した。

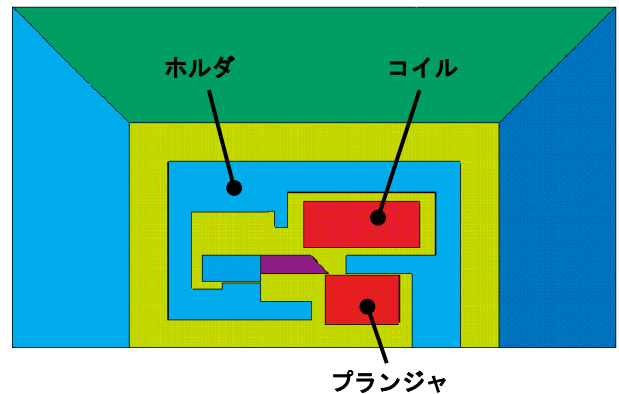


図6 ソレノイド解析モデル

5 制御モデル

対象のソレノイドは電流値制御にPWM制御^{注2)}(図7)を用いており、そのデューティー比^{注3)}を決めるためにPI制御(図8)が用いられている。設定推力に対しての応答性を評価するためには、電流制御を考慮する必要があるため、これらの点も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再現した。

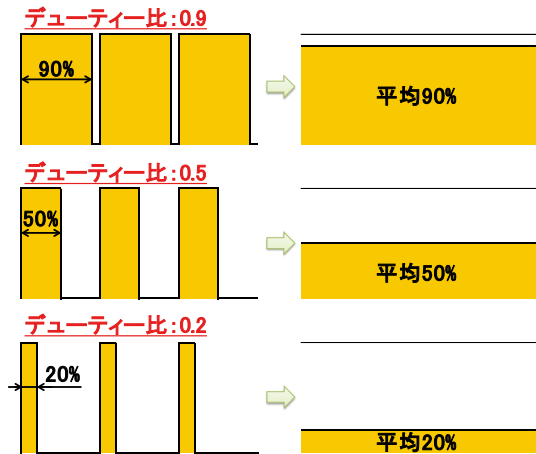


図7 PWM制御概念

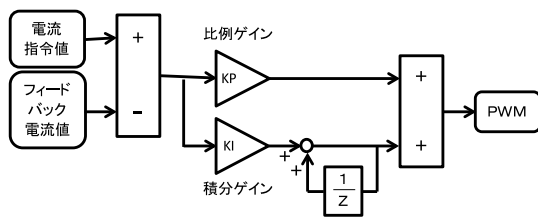


図8 PI制御概念

- 注2) 一定電圧の入力から、パルス列のONとOFFの一定周期を作り、ONの時間幅を変化させる事で、出力される電力を制御する方式。
- 注3) ある一定の周期でON-OFFを繰り返すパルス列において、パルス幅 (ONの時間) をパルス周期 (ONとOFFを合計した時間) で割った比率。

6 解析モデルの検証

解析プログラムの妥当性を確認するために、応答性 (時間と電流の関係) の比較を行った。

図9に、内蔵部品の有無による解析結果 (磁束線図) の比較を示す。

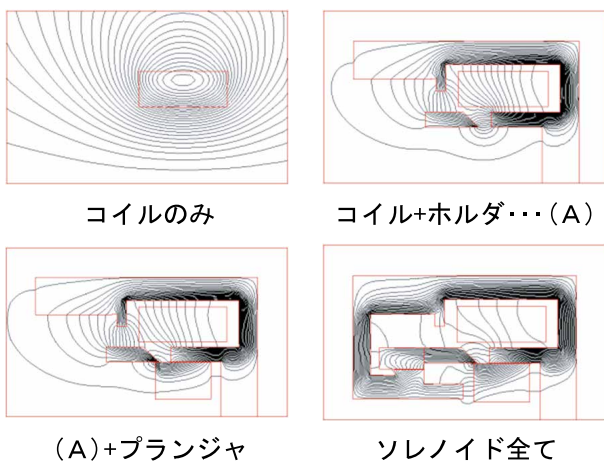


図9 内蔵部品の影響確認 (磁束線図)

図10に、内蔵部品の有無と応答性の関係を示す。内蔵部品が増加するほど、応答性が悪化する状況を解析においても再現できた。

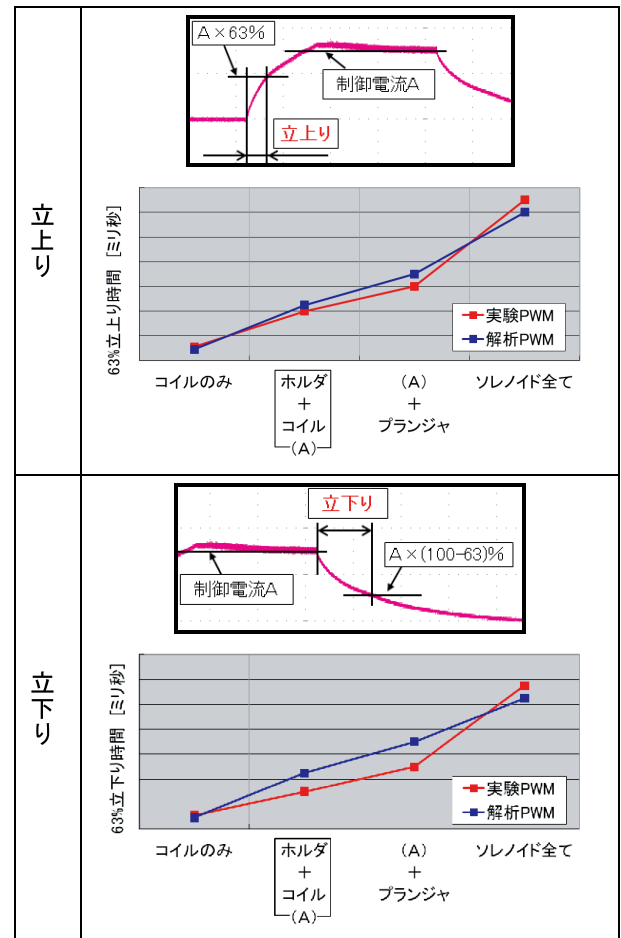


図10 内蔵部品の影響確認 (応答性)

図11は、実験結果の出力図の上に、スケールを合わせて解析結果のグラフを重ね書きしたものである。

PWM制御有無にかかわらず、解析結果は実験結果の応答性の傾向を良く再現できており、今回作成

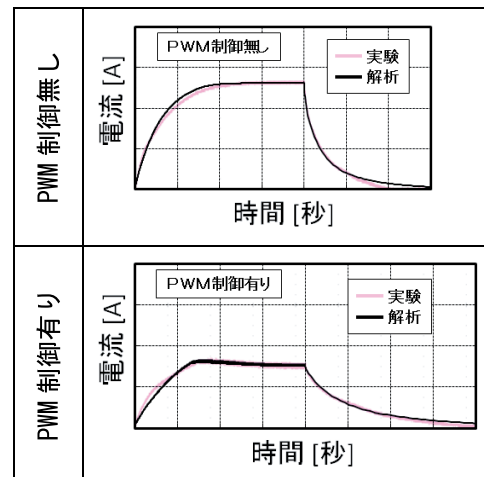


図11 実験と解析の比較

したモデルが実用上問題ないことが確認できた。

7 実験計画法による事前評価

図12は、同一条件における吸引力と電流値の解析結果である。立上りは吸引力の応答性が悪く、立下りは電流の応答性が悪い。

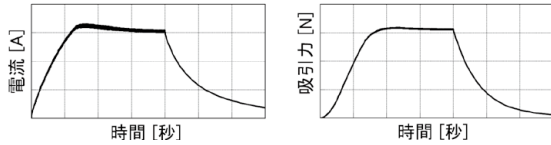


図12 同一条件における電流と吸引力の解析例

各因子の傾向を把握し、よりの確に品質工学を適用するために、事前に実験計画法(L16)による評価を実施した。その結果を図13に示す。

電流と吸引力の要因効果図は近い傾向にあり、電流の応答性を改善すれば、吸引力の応答性も改善できる可能性が高いことが分った。また、評価した因子の影響度合いも確認でき、ソレノイド部で起きている現象について理解を深めることができた。この評価によって得られた知見を基に、品質工学における評価方法、制御因子及び誤差因子を考案した。

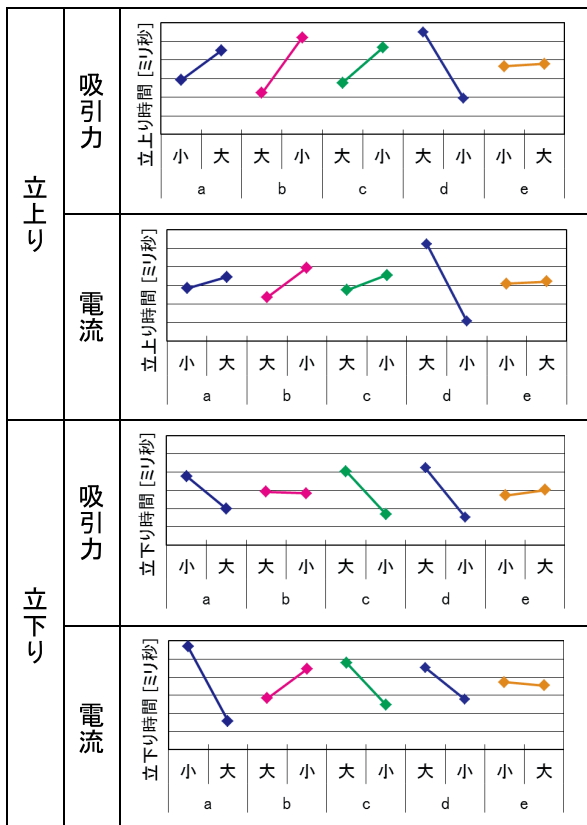


図13 応答性の要因効果図比較

8 品質工学の適用

8.1 パラメータ設計^{注4)}

品質工学には多くの手法が存在するが、本活動で用いたのはパラメータ設計である。パラメータ設計においては、対象製品における課題を解決するために、入力と出力の関係から機能を定義する必要がある。

比例ソレノイドの応答性改善のための機能を、本活動においては、入力は電流値(PWM制御)、出力は電流波形(電流の応答性)と考えた。

また、パラメータ設計では、誤差因子と制御因子を設定する必要がある。誤差因子は、市場での使われ方や製造工程などにおけるばらつきであり、設計者側で制御できない因子である。制御因子は、設計者が自由に設定できる設計パラメータであり、製品の課題解決のために調整する因子である。

以上に示したシステムの入出力関係について図式化したものがP-ダイアグラム(図14)である。

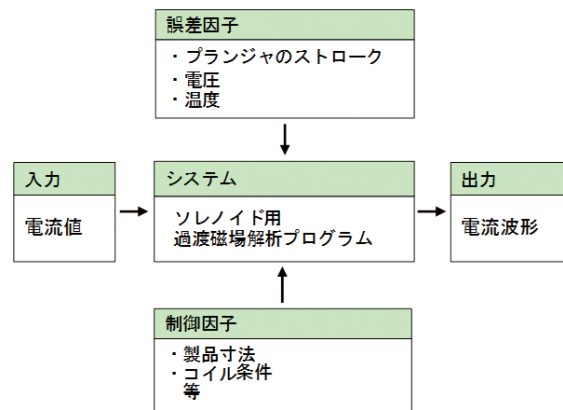


図14 P-ダイアグラム

注4) 製品の特性や機能性が、誤差因子に対してロバスト(頑健)になるように制御因子を設計する方法。

8.2 標準SN比^{注5)}

ソレノイドの応答性の理想は、波形の立上りおよび立下りが瞬時に行われることである。そこで標準SN比を用いて理想に近づく条件を求めたこととした。具体的には、図15に示したように、矩形波(赤線)を目標曲線^{注6)}とし、電流が目標曲線に近いほど良いと考えた。

解析には、設定した吸引力となるように電流設定値を自動調整するプログラムを用いたため、ロバスト性が低い場合は、電流波形が誤差因子間で大きくばらつくことになる。

今回は、目標曲線を標準状態N0^{注7)}とし、ノイズ条件(N1~N8)における電流波形が、標準状態N0に近づく制御因子の組み合わせを求めることで、ロ

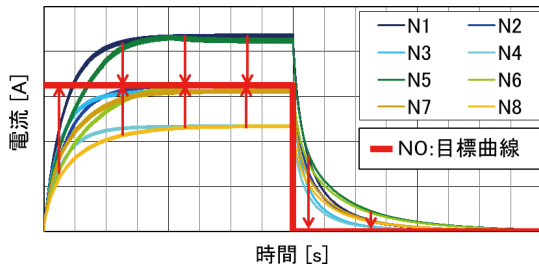


図15 標準SN比

バスト性向上と応答性向上を同時に達成できると考えた。

- 注5) 製品の機能を入力-出力で考えた場合に、理想と考える機能が、直線関係にない場合に用いる評価方法。
- 注6) その製品にとって理想と考える特性を表した曲線。
- 注7) 基準となる因子の水準の組み合わせ。例えば、ノイズのない状態。

8.3 誤差因子（ノイズ）

実際の使用状況においてばらつきが影響すると考えられる3因子（プランジャのストローク、電圧、温度）について直交配列（2水準）して得られた8水準（N1～N8）を誤差因子とした。

8.4 制御因子

製品において調整可能な8因子（製品寸法、コイル条件など）を制御因子（A～H）とした。これをL18直交表に割り振った。

8.5 解析結果

図16に、L18直交表の全条件（18×8条件）の解析結果を示す。条件によって、電流値の大きさや、立上り、立下りの応答性が大きく異なっていること

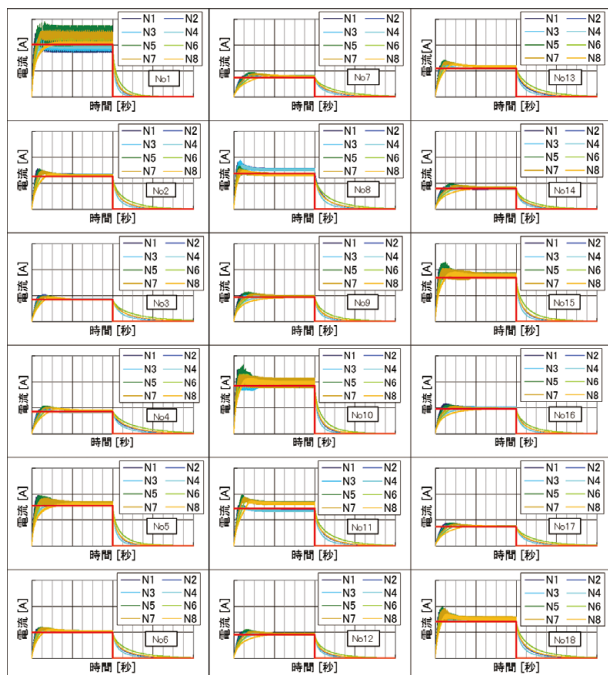


図16 解析結果一覧

がわかる。

図17に要因効果図を示す。応答性に対し、因子Hの影響が特に大きく、因子Bおよび因子Gも影響していることが分かった。

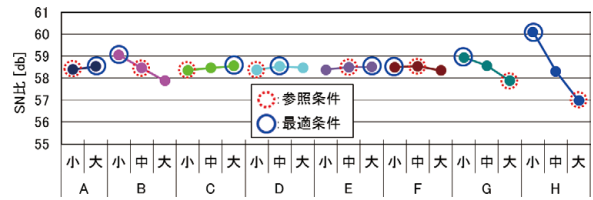


図17 要因効果図

図18に参照条件と最適条件の解析結果を示す。最適条件では、立上り、立下り共に応答性が向上している。なお、吸引力の設定値に合うように電流値を自動調節するプログラムを用いているため、両図の電流の絶対値は異なる。

なお、図18の最適条件は波形が振動しているが、これは応答性が高い条件において見られた現象である。

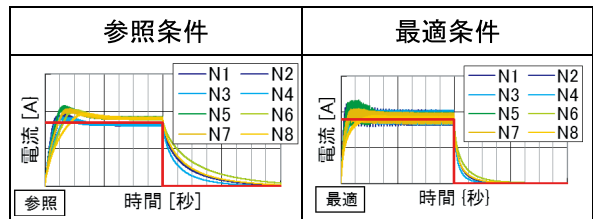


図18 参照条件と最適条件の解析結果（電流値）

表1にSN比の再現性確認結果を示す。推定値と確認結果の利得差は0.26dbと小さく、利得の再現性は高いことから、解析結果は信頼できると考える。

表1 再現性確認 [db]

条件	推定値	確認結果
最適条件	61.47	61.78
参照条件	56.26	56.31
利得	5.21	5.47

これらの結果から、応答性を向上し、ノイズに対してロバスト性を向上させるための知見を得ることができた。

9 振動低減

図18の最適条件において波形の振動が見られた。この現象が実際に発生するかは未確認であるが、問題となった場合の対策をあらかじめ解析上で検討することとした。

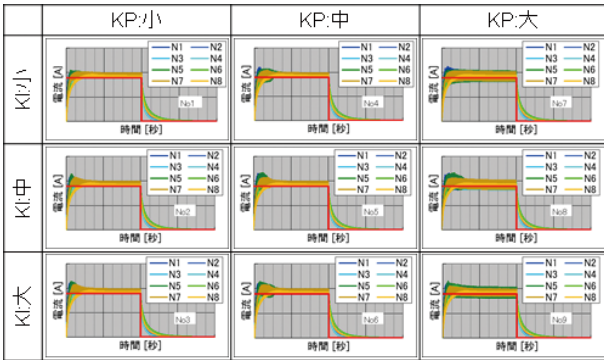


図19 KP値とKI値の影響

図19に、PI制御（図8）におけるKP値とKI値を調整することにより振動低減にトライした結果を示す。

確認した範囲においては、KP値を小さくすることで振動を低減できている。仮に解析と同様の振動が実際に発生した場合には、この考え方で改善可能と考える。

10 おわりに

本活動は製品開発の初期に行ったものであったため、製品化に至るまでの間に設計変更があったが、

著者



上野 和生

1993年入社。技術本部CAE推進部岐阜分室専門課長。生産技術研究所を経て現職。解析業務に従事。



松下 雄介

2007年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部サスペンション事業部技術部第二設計室。製品企画開発部を経て現職。ショックアブソーバの開発に従事。

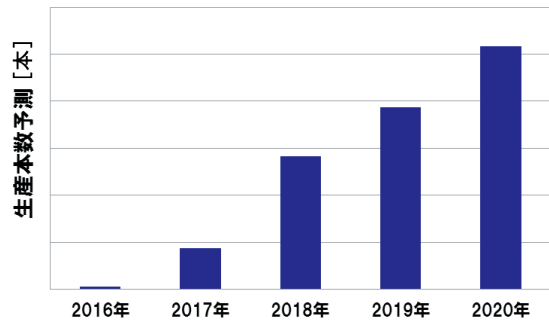


図20 外付け式SOL減調SA生産数予測

その際に本活動で得られた知見を基に応答性改善策が盛り込まれた。外付け式SOL減調SAは、2016年より量産が開始され、今後も採用車種・生産数ともに拡大が期待される（図20）¹⁾。

参考文献

- 1) 鎌倉, 古田, 森, 富田: 外付け式ソレノイド減衰力調整ショックアブソーバの開発, KYB技報第55号, (2017年10月).