

# イナータの試作及び実践的な検証\*

中里 武彦<sup>1)</sup> 青木 恒夫<sup>2)</sup>

## Prototyping and practical verification of Inerter Damper

Takehiko Nakazato Tsuneo Aoki

In order to pursue the suspension performance required for motor sports, we made a prototype inerter and mounted it on Super-FJ machine. In this paper, we describe the behavior of the inerter production process and its behavior when installed in a racing machine.

**KEY WORDS:** vehicle dynamics, suspension system, motion control, inerter, damper, Super-FJ (B1)

### 1. はじめに

サスペンションの機能の一つに、タイヤを常に路面に密着させ、加速、制動、旋回の機能を十分に発揮させることがあげられる。その発展には自動車を使ったスポーツであるレースやラリー等の自動車競技（以後、モータースポーツとする）が大きな役割をはたしてきた。

モータースポーツで求められるサスペンションも、常に路面とタイヤを密着させることにしのぎを削っているといっても過言ではなく、サーキット走行に伴う微振動が引き起こす路面とタイヤ間の圧力変化による摩擦力低下を避けるため、一定圧力に保持するダンパー機構が世界中で開発されている。

このような要求に沿ったサスペンション機構を深く理解することが、自動車整備関連業界に進む学生への一助となることを目的に本研究をはじめた。

本稿では近年、F1 (Formula 1) をはじめとする上級カテゴリーに位置するレーシングカーの一部に取り付けられている加速度を制御するイナータを試作し、中日本自動車短期大学（以後、本学とする）所有の Super-FJ マシンに取り付け、実際の走行に及ぼす性能を検証した。また、サスペンション機構と交流電気回路における類推（アナロジー）の可能性についても合わせて報告する。

### 2. イナータとは

イナータは、Malcom C. Smith（以後、スミスとする）が Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter<sup>(1)</sup> の中で紹介している慣性モーメント(inertia)を利用したダンパーのことである。工学的にはイナーシャと呼ぶことが一般的であるが、スミスの論文ではイナータと紹介され、モータースポ-

ツ業界ではイナータが通俗名であるため、本稿ではイナータと呼ぶことにする。

イナータの構造 (Fig. 1) は、路面からの入力に対しリンクを介して作動し、変位をボールネジにより回転運動に変換している。直線変位を回転運動に変えることにより、これまでの変位を制御するスプリング及び速度を制御するダンパーだけでは対応できなかった加速度が制御でき、サスペンション振幅を適正に保つことによりタイヤグリップ性能を上げるねらいがある。作動原理は運動方程式(1)に由来している。

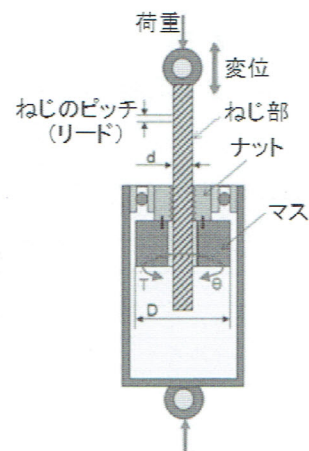


Fig. 1 イナータ

(運動方程式)

$$F = ma \quad (1) \quad F: \text{力}, m: \text{質量}, a: \text{加速度}$$

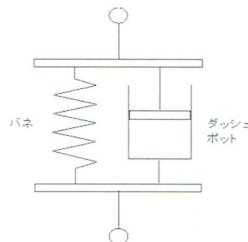


Fig. 2 機械的回路

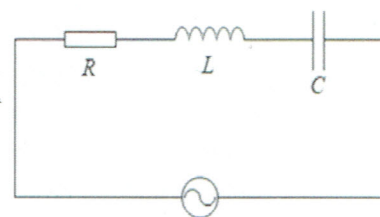


Fig. 3 電氣的回路

また、スミスはこの論文の中で、機械的回路 (Fig. 2) と電氣的回路 (Fig. 3) の類推について触れ、サスペンションを構成しているダンパーやスプリングを交流電気回路に置き換え、イナータの効果について説明している。

\*2018年8月2日受理. 2018年8月2日 全国自動車短期大学協会研究発表会において発表.

1)・2) 中日本自動車短期大学(岐阜県加茂郡坂祝町深葎 1301)

Fig. 4 および Table 1 に示すように、それぞれの要素を機械的又は電氣的に置き換え、イナータをコンデンサーにたとえ、イナータンス（イナータの持つ質量）を電荷に置き換えて説明している。

Mechanical	Electrical
$Y(s) = \frac{k}{s}$ $\frac{dF}{dt} = k(v_2 - v_1)$ spring	$Y(s) = \frac{1}{Ls}$ $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(v_2 - v_1)$ inductor
$Y(s) = bs$ $F = b \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$ inerter	$Y(s) = Cs$ $i = C \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$ capacitor
$Y(s) = c$ $F = c(v_2 - v_1)$ damper	$Y(s) = \frac{1}{R}$ $i = \frac{1}{R}(v_2 - v_1)$ resistor

Fig.4 回路図記号および  
関係式とアドミタンス Y(s)との対比<sup>(1)</sup>

Table 1 各要素の対比表

機械的	電氣的
力	電流
速度	電圧
機械的接地	電氣的接地
スプリング	インダクタ (コイル)
ダンパー	レジスタ (抵抗器)
イナータ	コンデンサー
運動エネルギー	電気エネルギー
位置エネルギー	磁気エネルギー

Fig. 4 の inerter 式 (2) より、イナータンスを変えることにより入力加速度に対する出力を制御できることが説明でき、また、この式はコンデンサーの式に類推しているといえる。

$$F = b \frac{d(v_2 - v_1)}{dt} \quad (2)$$

F: 力 (出力), b: イナータンス (質量), dv/dt: 加速度

さらにスミスは、今までのダンパーとスプリングだけの機械的回路には不備があるとも述べ、安定した電流 (力) を得るためにはコンデンサー (イナータ) が必要であり、コンデンサーの式が表す「時間の変化に対する電荷の変化」が、イナータの「時間の変化に対する速度の変化」に類推すると報告している。

### 3. イナータの試作と試走

#### 3.1 イナータ A の試作

イナータの試作にあたり、本学が所有する Super-FJ(MYST KKS-II) (Fig.5) に取り付け可能で、実走行により検証できる

ことを条件に進めることにし、市販のボールねじを素材に製作することにした。本稿では2つのイナータについて報告し、先に製作した物をイナータ A、次に製作したものをイナータ B と呼ぶ。

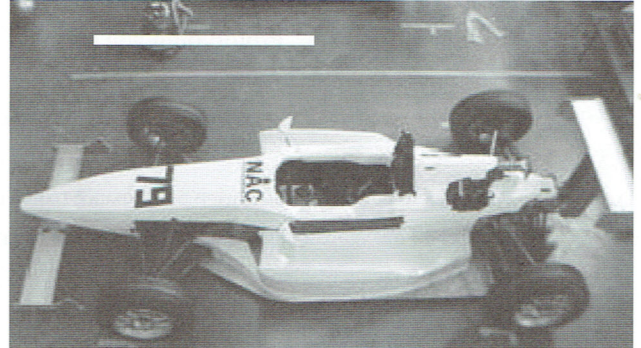


Fig. 5 Super-FJ (MYST KKS-II)

初のイナータ製作にあたり、Super-FJ に取り付けられているデータロガーの走行データを参考にボールネジ (NSK PSS1205N 1 D0221) を選定し、取り付けは上級カテゴリー車両に似る車両フロントサスペンションのみに限定した。取り付け方法はペルクランクの移動量及び干渉を考慮し、フロントスタビライザーの動きに対してイナータが動くように取り付けることとし、CAD を用いて稼働領域を考慮しながら図面を製作した。本体素材は重量と加工性を考慮し、アルミニウム (A7075) の丸棒を用いた。

製作は旋盤加工により約 10 日を要した。加工部品を Fig.6 に示す。また、車両側には脱着式のステーを製作しイナータの有無による比較が容易にできるよう工夫した。実際の取り付け状態を Fig.7 に示す。

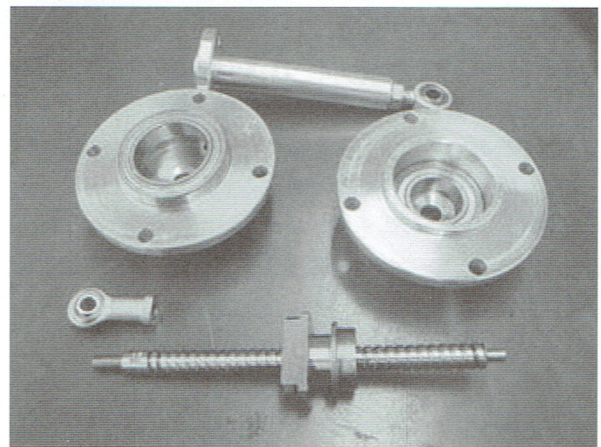


Fig.6 加工部品とボールねじ

#### 3.2 イナータ A での試走

2017 年 6 月、鈴鹿サーキットにおいてイナータの実装走行テストを行った。ドライバーは本学契約ドライバーの八巻 渉氏に依頼する。八巻ドライバーは Super-FJ による鈴鹿サーキット (Fig.8) における走行経験が豊富なドライバーでありテストドライバーとしては申し分ないと考えられる。

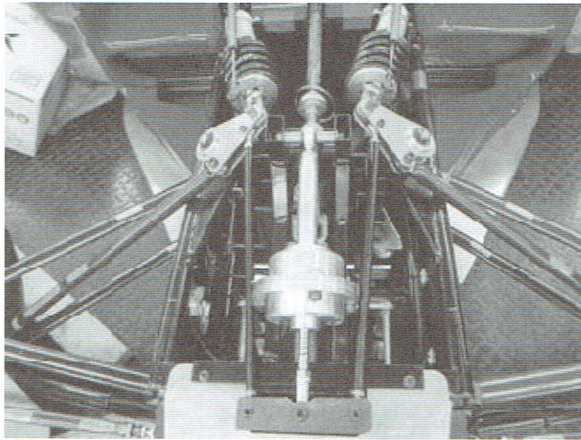


Fig.7 イナータ A の Super-FJ への取り付け

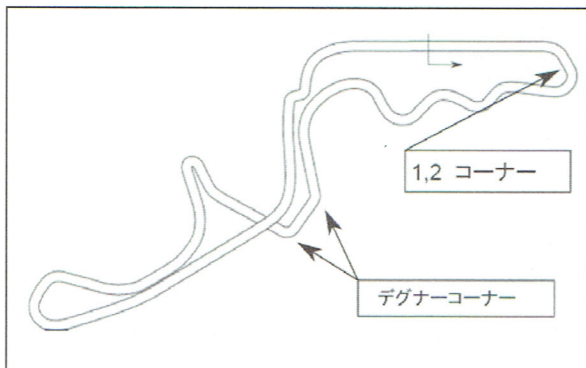


Fig.8 鈴鹿サーキットコース図

走行結果を Table 2 に示す。イナータ有りで、概ねラップタイムが短縮できることが確認できた。

走行順	LAP TIME	イナータ有無
1 回目	2'20"223	無し
2 回目	2'19"418	無し
3 回目	2'19"684	有り
4 回目	2'18"016	有り

Table 2 イナータ A によるラップタイム

ドライバーからのコメントは、「1, 2 コーナーは感触がよく、デグナーコーナーについてはステアリング反応が遅く、よくない」との事であった。

最初に第 1 コーナー部分について、データロガーを使用してイナータの有無による影響を比較したところ、アクセルコントロールの部分に堅調な違いのあることが確認できた。イナータ無しに比べアクセル開度 100 パーセントの回数が約 4 倍ある。これは、マシンの挙動が安定していることを意味し、ドライバーが安心してコーナーを攻めており、それはコメントにも反映されている。

一方、デグナーコーナーでのステアリング反応遅れは、サーキット走行の中では致命的な挙動となる。第 1 コーナーと

同じく、アクセル開度比較を Fig. 10 に示す。

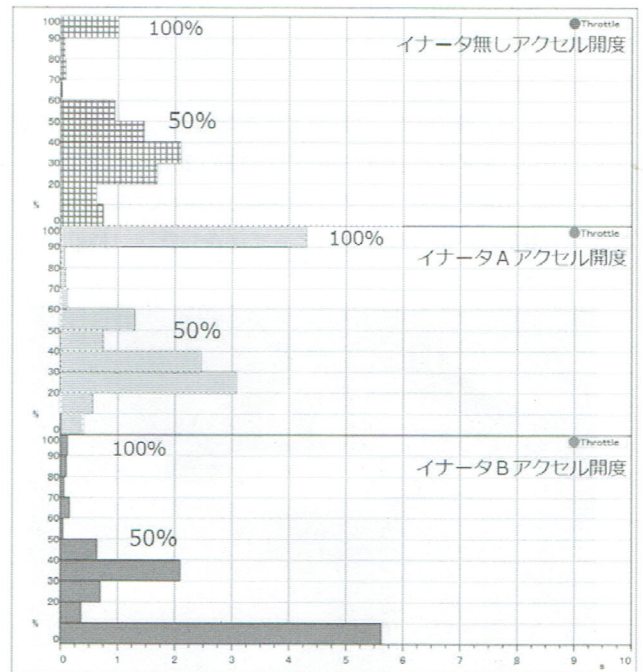


Fig. 9 第 1 コーナーでのアクセル開度比較

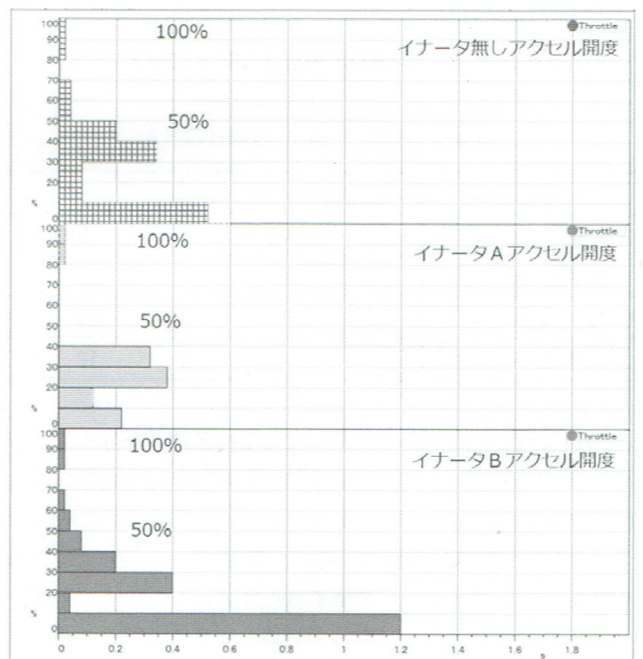


Fig. 10 デグナーコーナーでのアクセル開度比較

第 1 コーナーとは対比的に、イナータ無しと比較してアクセル開度が極端に小さい。マシンの挙動が安定せず、ドライバーがアクセルを踏むことを躊躇していることが伺える。ドライバーからの要望があり、今回のイナータ A によるテストはここで打ち切った。

### 3.3 イナータBの試作と試走

イナータAでの走行結果から、イナータAの持つ質量（イナータンス）が Super-FJ に対しては大きすぎたのではないかと考え、イナータンスの小さいイナータBを改めて製作し、実車に取り付けた。

イナータBの特徴は、質量を下げるためにボールねじのピッチ（リード）をイナータAと比べて2倍の20mmに変更し、マス外形も小さくした。また、左右輪からの入力に反応できるように小型化し、取り付け方法にも工夫をした。（Fig. 11）

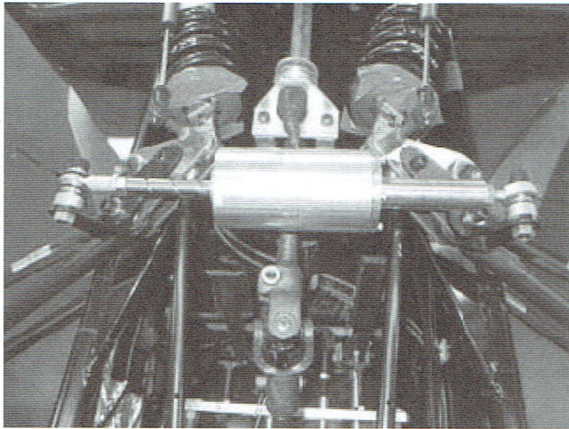


Fig. 11 イナータBの取り付け

イナータAとBの仕様の比較を Table 3 に示す。

Table 3 イナータAとBの仕様比較

項目	イナータA	イナータB
マス重量 g	154	140
マス外径 mm	44	24
リード mm	10	20
シャフト径 mm	12	12

2017年12月にイナータBによる走行テストを行った。結果はラップタイムが 2'18"65 と前回テストと比べ大きな差異は出なかった。ドライバーからのコメントは「デグナーコーナーでのステアリング反応が遅い、第2コーナーの出口で他車に遅れる」であった。ドライバーコメントからは、イナータA、Bに差異は無く、慣性力軽減の成果は確認できなかった。

## 4. 検証

### 4.1 第1-2コーナー

慣性力を低く抑えたイナータBでもイナータAと同様の特性を示すことに疑問を持ち、問題とされる各コーナーについて、データロガーを用いて検証を行った。

Fig. 12 は、第1-2コーナーでのフロント左ダンパーのスト

ロークをデータロガーにより記録したものである。実線がイナータ無し、破線がイナータA、点線がイナータBである。また、縦軸がダンパーストローク（mm）、横軸が時間（S）の経過を意味する。

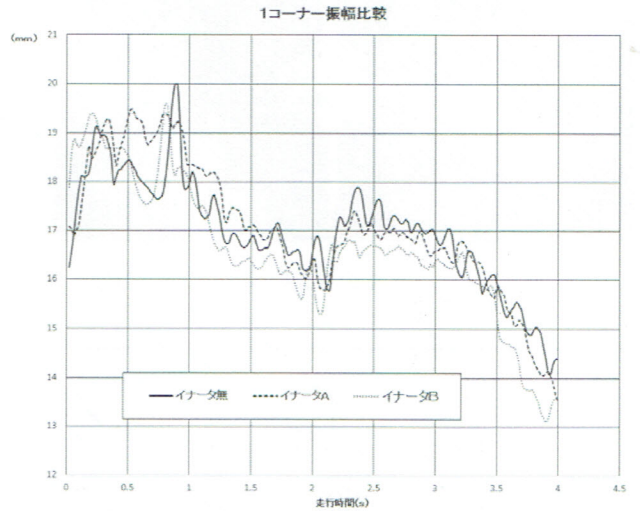


Fig. 12 第1-2コーナーでの減衰力の比較

このグラフから、イナータ装着をする事により路面からの入力に対してダンパーストロークが低く抑えられ、なおかつ隣り合う山と谷の差が小さく押さえられていることが、わずかながら確認できる。このことは、イナータを電気回路に置き換えた場合にコンデンサーに似た働きをし、高負荷（高加速度）をイナータが良く吸収し、Super-FJに安定した入力（路面接地）を与えたと言える。

### 4.2 デグナーコーナー

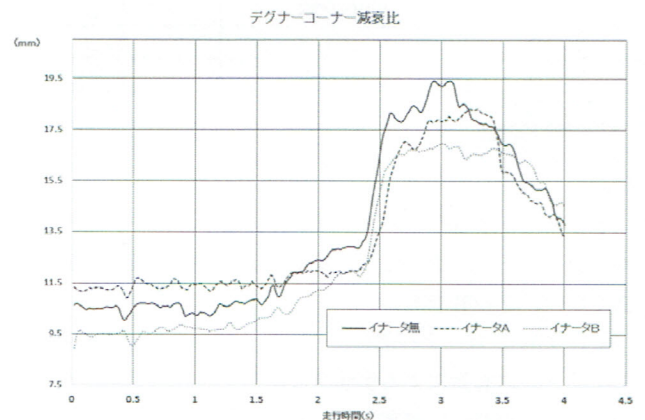


Fig. 13 デグナーコーナーでの減衰力の比較

デグナーコーナーでのステアリング反応の遅れについては Fig. 13 のようにイナータ無し（実線）に比べイナータA（破線）やイナータB（点線）は、フロント左ダンパーのストローク沈み込みに遅れが生じている。この遅れは主にコーナー

への進入時に生じている。イナータをコンデンサーに類推してみれば、コーナー進入など一方向への入力が増えた、言い換えれば周波数が小さくなり電流が流れにくくなったことと同じ現象が起きている。このことによりデグナーコーナーでのステアリング反応遅れの原因が、周波数低減によるものであると考えられる。

対応策として考えられるのが、イナータ自体はコンデンサーのようにすぐに容量（可動容量）がいっぱいにはならず、まだ入力（蓄電）に余裕があるので、入力速度を速める事によりステアリング反応遅れを解消できるであろうと推測できる。

具体的な対応として、電気回路の抵抗に当たるダンパー減衰を小さく（低く）抑えることが考えられる。Super-FJに取り付けられているダンパーには減衰力の調整機構（Fig. 14）があり減衰力の強弱を32段階で調整できる。数字が大きいほど減衰力が弱くなり、テスト走行では28段を使用していたので、残り4段で最弱の状態である。

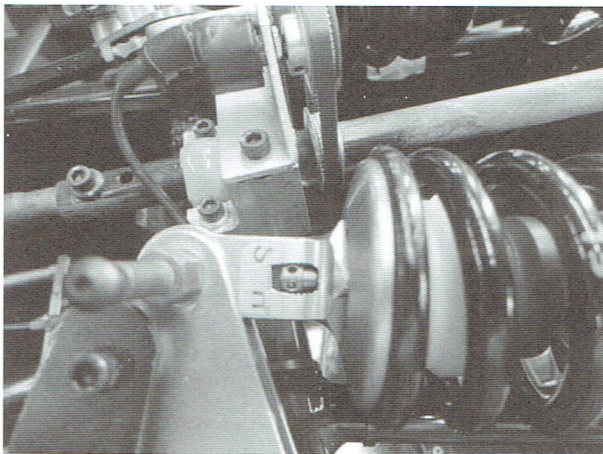


Fig. 14 Super-FJ のダンパー減衰力調整機構

実際の減衰をダンパーテスターにて測定し検証を行った結果が Fig. 15 および Table 3 である。

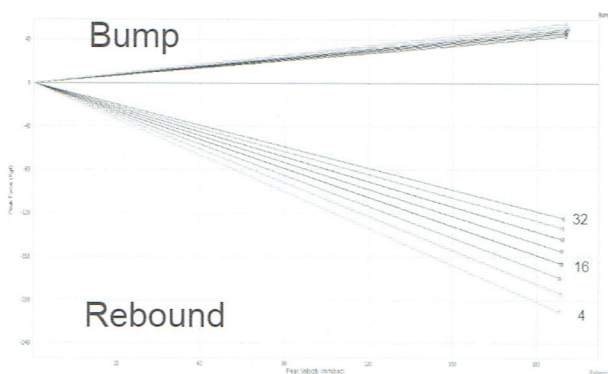


Fig. 15 ダンパーの減衰力変化

Fig. 15 は、フロント左ダンパーの減衰力を0段、4段、8段と4段飛びに32段まで測定したダンパースピードと減衰力の変化を表している。縦軸に減衰力、横軸にダンパースピードをとり、上に伸びるグラフはバンプ（縮み）を表し、下に伸びるグラフはリバウンド（伸び）を表している。Fig. 15 から、減衰力調整によるリバウンドの変化は見られるが、バンプ側にはほとんど変化が見られないことがわかった。

Table 3 ダンパースピードと調整段ごとの減衰力

	4段	12段	20段	28段	32段
8 (mm/s)	1.992	1.7128	1.612	1.548	1.5216
9 (mm/s)	2.241	1.9269	1.8135	1.7415	1.7118
10 (mm/s)	2.49	2.141	2.015	1.935	1.902
11 (mm/s)	2.739	2.3551	2.2165	2.1285	2.0922
12 (mm/s)	2.988	2.5692	2.418	2.322	2.2824
13 (mm/s)	3.237	2.7833	2.6195	2.5155	2.4726
					(Kgf)

Table 3 は、グラフを数値化したもので、これによると28段から32段での減衰力の変化は、きわめて微小であることも判明した。

これにより、デグナーコーナーでの反応遅れ対策として、今以上にダンパー減衰力を弱めることが必要であるが、現状のダンパーでは不可能であることがわかった。

## 5. 今後の課題

現在使用しているダンパーの調整機構は、バンプとリバウンドをかねた1つの調整バルブしかないが、低速から高速域まで調整できる4バルブ式のダンパーを用いた検証が必要と考えられる。また、イナータの加速度に対する減衰力の相互関係を理解するには、より多くのデータ蓄積が必須で、このことが早期の問題解決に繋がると期待出来る。

## 6. まとめ

今回の研究を通してイナータの特徴がいくつか見え、その中には今後の課題も含まれ、減衰力適正化の難しさを改めて知る事になった。今後は以下の結論に留意し、実戦で使用できるイナータを模索したい。

- ① イナータについて、サーキット走行での有効性が確認できた。
- ② 減衰の多い（周波数が高い）コーナーで、入力の均一化が見られた。
- ③ 減衰が一方向の場合（周波数の低い）、路面からの入力が伝わりにくいという特性がある。
- ④ イナータとコンデンサーとの類推特性が確認できた。
- ⑤ ダンパー（電気要素の抵抗）と合わせたセッティングが難しく、そのためのデータ取得が必要である。

- ⑥ イナータの心臓部となるボールねじの耐久性について、走行後の分解検証が必要である。

## 7. 謝辞

本研究の実施にあたり「一般財団法人 東京自動車技術普及協会」の助成金を使用させて頂いたことに感謝の意を表します。併せて本研究のテスト走行にご協力いただいた八巻ドライバーをはじめ、テスト走行に同行し車両の準備をしてくれた本学モータ・スポーツ・エンジニアリング学科の学生諸君、適切なアドバイスを頂いた同学科教員の諸氏にお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) Malcolm C. Smith: Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 47, No.10, p.1648-1662(2002)
- (2) 中里武彦: イナータの試作及びポストリグ試験, 中日本自動車短期大学論叢, 第47号, p. 15-26 (2017)
- (3) 中里武彦: サーキット走行における S-FJ に与えるイナータ・ダンパーの影響, 中日本自動車短期大学論叢, 第48号, p. 7-14 (2018)
- (4) 北森俊行: 電気回路とアナロジー, 応用科学学会誌, Vol. 24 No. 1, p. 5-7 (2011)
- (5) 大熊康弘: 初めての電気回路, 技術評論社, 2000, 380p.
- (6) 小野昌朗: モーター・スポーツとクルマ, 自動車技術, Vol. 71-1, p86-92 (2017)
- (7) 日本自動車整備振興会連合会: 二級自動車シャシ, 東京, 2017, 246p.
- (8) 自動車技術会: 自動車工学—基礎—, 東京, 2009, 332p.
- (9) 近田久也: くるまと電気, 東京, 鉄道日本社, 2001, 296p.
- (10) 潮秀樹: 力学の基本と仕組み, 東京, 秀和システム, 2006, 333p.
- (11) 中山正敏: 電磁気学, 東京, 裳華房, 1986, 254p.
- (12) 富樫研究開発: ダンパー講座,  
<http://a011w.broad.jp/cantalwaysget/>, 2018