

イナーターの試作及びポストリグ試験

中里武彦

1. はじめに

近年のレース車両の性能を向上させる手段として、イナーターと呼ばれる減衰装置が注目されている。特にF1を頂点とする上級クラスのフォーミュラーでは、レースの結果を左右する重要なアイテムとして期待されているが、まだ広く普及しているとは言い難いのが現状である。また、既に市販されている高価なイナーターを利用することも1つの手段ではあるが、今回は市販のボールねじを利用したイナーターの試作を試み、本学のS-FJに取り付けた場合にどのような効果が得られるかポストリグ試験を行って検証を行った。以下、得られた結果について報告する。

2. イナーターとは

まず、辞書でIn-er-tiaを調べてみたところ①(名)活力のなさ、硬直化、無気力、ものぐさ②(物)慣性、惰性とあった。ここでの意味は②の慣性になる。また、動力学の中に、「静止している物体は動き出しにくく動いている物体は止まりにくい。」と記されており、物体の持っているこのような性質を慣性(inertia イナーシャ)という。

これは運動の第1法則の直線運動を回転運動に置き換えて考えたということであり、それぞれの関係は式(1)(2)になる。

(直線運動方程式)

$$m a = F \quad (1)$$

m:質量(Kg)
F:力(N)
a:加速度(m/sec^2)

(回転運動方程式)

$$I \alpha = T \quad (2)$$

I:慣性モーメント($kg \cdot m^2$)
T:トルク($N \cdot m$)
 α :角加速度(rad/sec^2)

今までの、サスペンションではタイヤからの入力に対して、直線的な運動でしか応答できなかった

たその為、減衰比（3）の最適化が必要になってくるのである、しかし、いかに最適化がなされても、操縦性、快適性などタイヤグリップとの間には妥協がある、敏感な操縦性をもたらすためにサスペンションを硬くすれば、タイヤへの負荷が急激に変化しやすく振動をまねき、結果的には操縦し辛くなってしまう。

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mk}} \tag{3}$$

C = 粘性減衰係数
 m = ダンパーにかかる荷重
 k = ばね乗数

イナーターでは、タイヤからの入力を回転運動に変えることで、今までの減衰自由振動の波形に位相を生み出し、減衰比が小さいながらも振動しにくくするシステムである、この文の中では、このシステムをイナーターと呼ぶことにする。

さて、一般に機械系での振動の制御ではスプリングやダンパーが使用されてきたが、電気系での制御ではコイルと抵抗の他にコンデンサーによる効果も利用されてきた。上述のイナーターは、図1に示すように電気系のコンデンサーの効果を機械系に利用するといった見方もできる。また、イナーター自体は以前から存在していたものだが、それを、レーシングカーのサスペンションに応用したのがマルコム・スミス教授である。スミス教授の論文の中に機械的なネットワークと電気的なネットワークの考え方は応用が出来ると記されており（図1）、こうした考えによる教授の発明したサスペンションシステムが現在のレースで重要な部分に活用できるのではないかと期待されている。




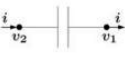
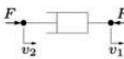

Mechanical	Electrical
 $Y(s) = \frac{k}{s}$ $\frac{dF}{dt} = k(v_2 - v_1)$ spring	 $Y(s) = \frac{1}{Ls}$ $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(v_2 - v_1)$ inductor
 $Y(s) = bs$ $F = b \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$ inerter	 $Y(s) = Cs$ $i = C \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$ capacitor
 $Y(s) = c$ $F = c(v_2 - v_1)$ damper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

図1 機械、電気ネットワーク

(参考文献 (1) Fig 4)

3. イナーターの製作

3.1 製作準備

今回、イナーター製作にあたり、次の2点を目標に製作に取り掛かった。

- ①本学所有のMYST KKS-2のフロントに取り付けられるようにすること。
- ②ポストリグで、性能検査を行うことができるようにすること。

イナーターの構成部品は、はずみ車とそれを回転させる

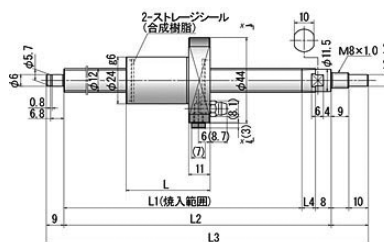


図2 ボールネジ

(NSK PSS1205N 1 D0221)

機構、それらを保持するケースからなり。この中のはずみ車と回転させる機構については、冒頭に述べたように市販されているボールネジ（図2）を流用することにし、ケースはアルミニウム（7075）を削りだすことにした。

このイナーターの本体ともいえるボールネジの選定には、ダンパーシャフトと同じ太さのφ12である事、加工しやすさなどからNSK社のPSS1205N1D0221 図2を選んだ。また、リードは10mmとした。

3.2 製作

実際の設計、製作にあたり、ボールベアリングのはずみ車部分の支え方について様々な手法を検討してみたがTEAN DANDELION RACINGの吉田監督からのアドバイスにより（図3）のように、はずみ車両端をベアリングで直接支持することとして、サイズが合わない部分は、アダプターを製作して合わせることができるようにした。

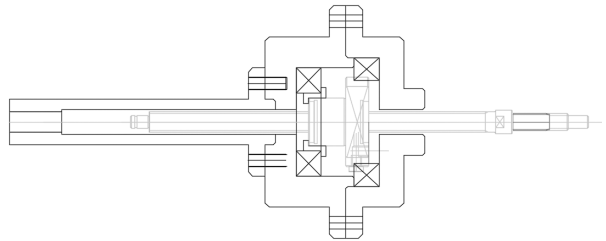


図3 イナーター図面

イナーターの特性を有効活用するためにはは回転方向の力による効果を発揮させることであるがボールネジは前後方向には動くので、隙間が大きい場合にはこの方向の揺れによってイナーター性能を低下させる要因になる。また、クリアランスが小さすぎると動きが鈍くなりこの場合もイナーターの利点を生かすことができなくなるので、加工後の組み付け時にも調整ができるようにアウターケースは、3分割とした。

図4aは、加工され、組み付け前のNACイナーターを構成する部品であり、（図4b）はNACイナーター組み上げた完成品である。

完成したイナーターは、安全率を過剰にとってしまったために、質量が当初の予定より大きく1816gであった。従って、取り付けて走行させた場合を考えると、車両に与える影響も大きいですが、イナーター自身に働く慣性も大きく、φ12のシャフトが弱々しく見えるほどである。

また、イナーターを手動により作動確認をしたところ、組み付け初期は伸び側方向で固着して



図4a 構成部品



図4b NAC製イナーター完成品

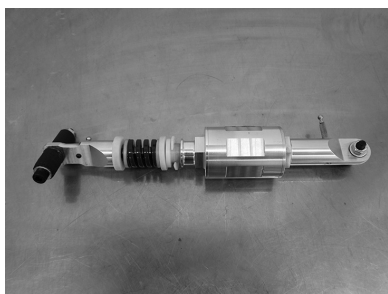


図5 実戦イナーター

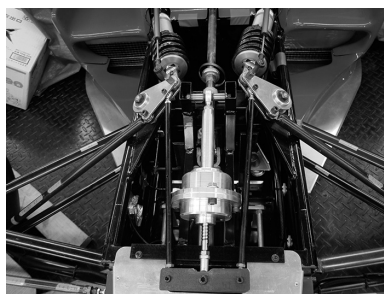


図6 イナーター取り付け

しまう場合もあったので、そのような場合にはベアリングのはめあい調整と、ボールネジの潤滑油を変更するなどして対応した。

今回、イナーターを製作するにあたり、実戦で使用しているイナーター（図5）をお借りすることができた。やはり設計段階での、考察がされていて動きもスムーズである。しかも軽量、コンパクトで、本学製作のものとはずいぶん違っている。このイナーターもS-FJに取り付け、今回の、ポストリグ試験をさせて頂いたので、こちらの結果も合わせて報告する。

3.3 走行データに基づき制作したイナータンスの検証

このようにして、本学のイナーターを完成させることができたが、どの程度の効果を発揮できるのか、また、ポストリグ試験に耐えられるのかといった点について検証してみた。

イナーターの取り付け方法によっては、サスペンションからの入力ストロークが変化して、複雑な結果になることも予想されるので、（図6）のようにフロントダンパーと並行にマウントする事としイナーターとダンパーのストローク量は、ほぼ同じとした。

まず、最初にとりかかったのが、KKS-2のフロントダンパーストロークの解析からである。

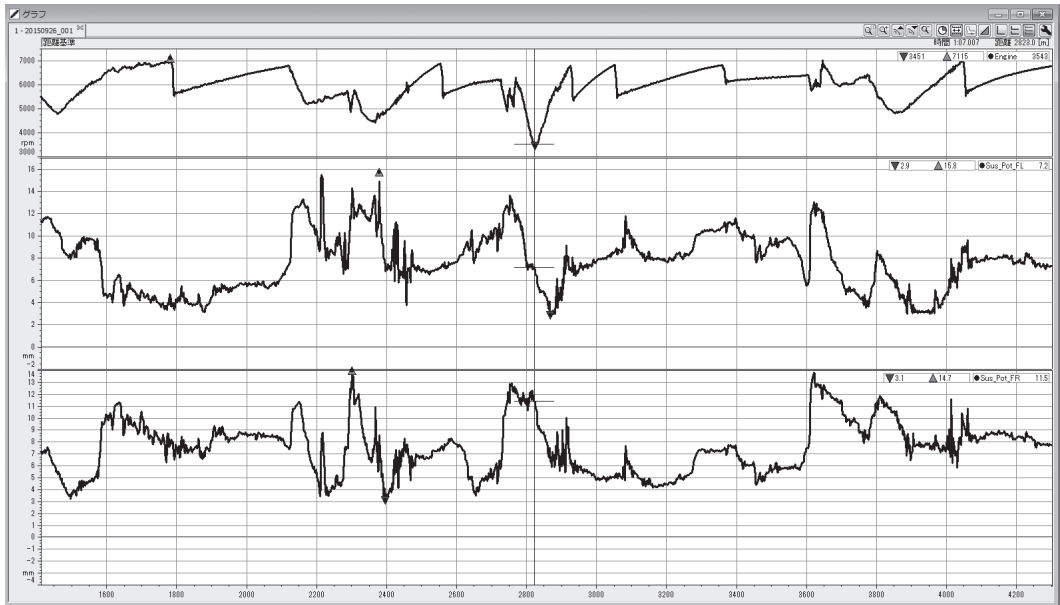
グラフ1は、昨年、坂口晴南選手がスズカサーキットをドライブした時のログデータ（AIM社製）です、グラフ上段からエンジン回転数、FL（左）ダンパーストローク、FR（右）ダンパーストロークの順である。エンジン回転数はコースの位置を知るために、目安として表記し、グラフ中央にある縦線の位置がヘアピンコーナーの位置である。

このグラフから見て取れるように、ダンパーストロークが急激に動いている箇所が複数見られる、これは、路面からの入力に対してダンパーが動いていることであり、グラフが急激に上下する部分は、入力が大きくダンパーが速いスピードで動いている部分である、頂点が鋭く突き出ているところは、ダンパーの動く方向が瞬時に逆方向に転換されていることを表している、前の項でも述べたが、急激なタイヤへの負荷は振動を招き、接地性能を低下させることになる。

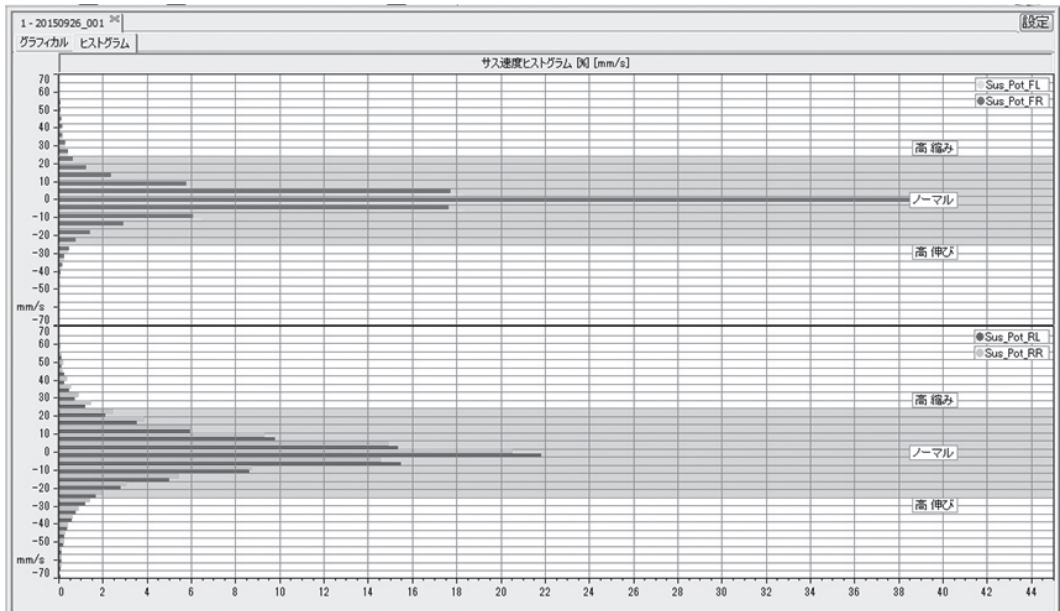
ダンパーは入力の速度に対して減衰力を発生するが、イナーターの慣性は加速度（2）である為、グラフ1のダンパーストロークの中の加速度の高いところ、つまり、ダンパーが、逆方向に動く時に急激にはではなく理想的な動きにコントロールすることが可能である。

グラフ2は、グラフ1のダンパースピードをヒストグラムに変換し、使用範囲をグラフにした

中里武彦：イナーターの試作及びポストログ試験



グラフ1 フロントサスペンションストローク



グラフ2 ダンパースピードヒストグラム

ものであり、この上側のグラフがフロントのダンパースピードである。

グラフ2から、ダンパースピードが高い部分は頻度が減っているといえる。一般的には、ここまで速い路面入力として考えられるのはマシンが縁石に乗り上げた場合が多く、バンプ側の高速

域の頻度の少ない部分は縁石にタイヤが乗り上げた時のものとして考える事にし、運動性能の範囲外とした。

イナーターがどの程度の力を持つかを表すのに、イナータンスを使う、単位はKgである、今回のイナータンスはどの程度見込まれるのか、グラフ1、グラフ2の測定データを基に算出してみた。

グラフ1内のFL,FRにある△がバンプ側の最高測定値、FL 15.8mm、FR 14.7mm ▽がリバウンド側の最高測定値 FL 2.5mm、FR 1.4mm になり、バンプとリバウンドの差がダンパーストローク量になり、この数値からダンパーストロークは左右とも13.3mmとした。

さらに、グラフ1のストローク量をダンパースピードのヒストグラムに変換し、使用範囲をグラフにしたものがグラフ2になり、この上側のグラフがフロントのダンパースピードになります。

バンプ側の高速度の頻度の少ない部分は縁石にタイヤが乗り上げた時のものとして考える事にし、運動性能の範囲外とした。

測定値からの読み取りで、ダンパーストロークスピードのフロントを55mm/sとし、リアを60mm/sとした。

ここで、どれくらいのイナータンスが求められるのかを富樫研究所の計算式、式(4)を使ってS-FJにイナーターを取り付けた場合の慣性力を求めて、ポストリグ試験に耐えられるかを検証してみた。

$$F = \frac{2\pi^2 \cdot m \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{pitch^2} \ddot{X} \quad (4)$$

式(4)中のイナータンスと呼ばれる部分が式(5)である。

$$Inertance = \left(\frac{2\pi^2 \cdot m \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{pitch^2} \right) (Kg) \quad (5)$$

Pitch : screw pitch (m) m : mass (kg) D : diameter of mass (m)

式(5)に下記のような実測値を代入することによってイナータンスの値を求めることができる。

pitch (m) : ボールネジのリード寸法10 (mm)

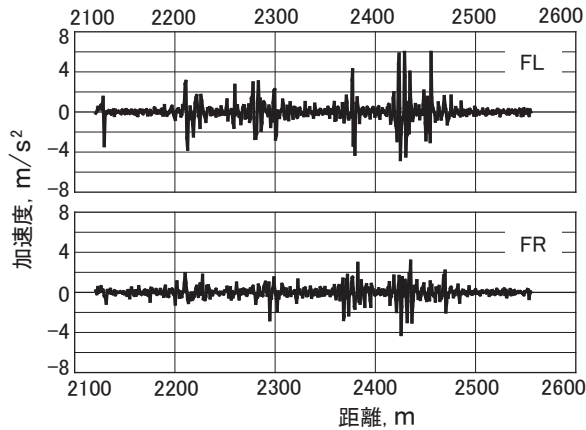
m (kg) : ボールネジ, はずみ車部重量 94 (g)

D (m) : ボールネジ, はずみ車部外径 44 (mm)

(ボールネジ(図2)のものを実測した数値である)

計算してでた値が、17.9 (Kg) のイナータンスが求められた、式(4)より、この数値に加速度を乗ずれば実際の力Fが求められる。

式4の加速度を求めるために、走行データ(グラフ1)の中からダンパースピードが一番速いと思われるデグナー前のバンプ側に着目し、その部分の加速度を計算した結果がグラフ3である。



グラフ3 フロントダンパー加速度

その結果より $1.136 \text{ (m/s}^2\text{)}$ が得られ、式 (5) に示すイナータンスの値より $F = 20.38 \text{ (N)}$ が求められた。

しかし、加速度 $1.136 \text{ (m/s}^2\text{)}$ は、この部分のみが他の部分と比べて極端に大きな値であるので、この部分は縁石に乗り上げたものと考えられ、次点の加速度 $0.5695 \text{ (m/s}^2\text{)}$ を有効な数値とみなせば、式 (4) より、

$F = 10.21 \text{ (N)}$ が求められた。

本学S-FJのフロントスプリングは450 (lb) である、これを (N) に換算すると 78.81 (N/mm) である。ダンパー加速度、 $1.136 \text{ (m/s}^2\text{)}$ のときにダンパーの動きと逆方向に $F = 10.22 \text{ (N)}$ の力が働くはずである。

現時点では、S-FJのポストリグ試験自体が始めてであることもあり、大きな力を掛けすぎて破損のリスクがあるよりも確実に試験を行う方向で、イナーターには追加ウエイトを載せない事にした。

4. ポストリグ試験

4.1 ポストリグ試験概要

ポストリグ試験自体は、御殿場にある Team Le Mans さんの施設で行った。本学のS-FJを用いてポストリグ試験を行うことは初めてであるが、試験用車両に測定用センサーを取り付け、図7のように設置した。ポストリグ試験を行うに当たり、出来る限り走行状態を再現するために、コックピットに特殊なウエイトをのせ、レース時と同じ 497Kg に調整した、給油したガソリンは10Lである。

タイヤは新品を用意し、空気圧をレース時の走行中の圧に調整した。もちろん、サスペンションボルトの緩みなどがあれば、正確な測定データを得ることができないので注意深くチェック

を行った。

今回の試験項目(表1)は、本学 MSE 学科の学生と話し合っ て決め、実際のレースでの状況測定と、そこからの問題点探求が主になる、イナーターに関しては残り時間の中で試験することとなった。

表1のC/Wはコーナーウエイトの試験機での測定値を示している、このドライバー乗車と同じ状態の重量値がリグ試験測定の基本数値であり、Test Noはテスト内容と計測グラフを照らし合わせるために定めた。テスト内容については、どの状態のテストなのか後にわかりやすいような名前としてつけてあり、精度向上のために2回測定している。ヒープは左右同相に加振を与えた時の測定、ロールは車両のロール測定である、ダンパー、タイヤ空気圧、アンチロールバーは、試験条件についてセットの状態を表記している。

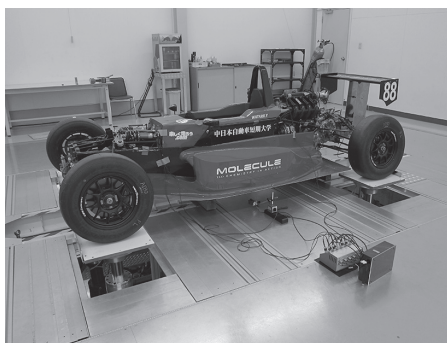


図7 ポストリグ試験機

表1 ポストリグ試験内容

2016 ポストリグ試験内容 (KKS-2)		2016,12,16							
スプリング		F 450 lb 0T	R 500 lb 2T						
C/W		0.982	↑ 0.975	(Kn)					
		1.471	1.509	(Kn)					
パネ下重量		F 16 Kg	R 24 Kg						
Test No	内容	Fダンパー	Rダンパー	F air	R air	F ARB	R ARB		
1	2016 suzuka最終戦 暖機	ヒープ	9	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
2	2016 suzuka最終戦 暖機	ヒープ	9	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
3	2016 suzuka最終戦	ヒープ	9	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
4	2016 suzuka最終戦	ヒープ	9	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
5	2016 suzuka 夏	ヒープ	15	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
6	2016 suzuka 夏	ヒープ	15	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
7	2015 sena	ヒープ	18	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
8	2015 sena	ヒープ	18	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
9	フロントソフト	ヒープ	24	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
10	フロントソフト	ヒープ	24	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
11	フロント全開	ヒープ	30	18	1.45	1.45	M-H	M-M	
12	フロント全開	ヒープ	30	18	1.45	1.45	M-H	M-M	
13	実戦 イナーター	ヒープ	30	18	1.45	1.45	M-H	M-M	
14	実戦 イナーター	ヒープ	30	18	1.45	1.45	M-H	M-M	
15	実戦 イナーター 最終戦セット	ヒープ	9	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
16	実戦 イナーター 最終戦セット	ヒープ	9	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
17	NAC イナーター	ヒープ	30	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
18	NAC イナーター	ヒープ	30	12	1.45	1.45	M-H	M-M	
19	Air	ヒープ	30	12	1.65	1.65	M-H	M-M	
20	Air	ヒープ	30	12	1.65	1.65	M-H	M-M	
21	Air	ヒープ	30	12	1.15	1.15	M-H	M-M	
22	Air	ヒープ	30	12	1.15	1.15	M-H	M-M	
23	ARB	ロール	30	12	1.15	1.15	M-H	M-M	
24	ARB	ロール	30	12	1.15	1.15	S-S	S-S	
25	ARB ガタアリ	ロール	30	12	1.15	1.15	H-H	H-H	
26	ARB	ロール	30	12	1.15	1.15	H-H	H-H	
27	ランダム		30	12	1.15	1.15	H-H	H-H	

4.2 試験報告

(図8 a,b,c)は、表1のNo12, イナーター無し, No14実戦イナーター, No18NAC イナーターのポストリグ試験測定結果になり、表1からわかるようにこの測定は、イナーターの有無、または違いのみの変更で、他の条件は同じである。

ポストリグ試験測定結果からは、もっと多くのグラフが表示されるのだが、今回はイナーター装着によって違いがわかりやすいグラフに着目して検討を行った。

図8の測定結果のグラフであるが、それぞれの条件の測定結果につき、小さいグラフが4つとボート線図1つの全部で5つあり、その中の左上の赤と青2つのグラフは振動グラフで、加振機からの入力に対する車体の加速度を表している、赤はフロントを、青はリアを表し、0から上の部分はリバウンド側の加速度、0から下のマイナス表記はバンプ側の加速度の変化を表している、グラフの良否の判別として、バンプ、リバウンドの波形がある程度似ている（上下の波形が似ている）ことが望ましく、バンプに対してリバウンドが強すぎるとジャッキダウン現象が起こり、ダンパーが縮むが伸び切れない現象が起こる。

その下の黄色と水色のグラフは同じく、加振機からの入力に対するタイヤの加速度であり、黄

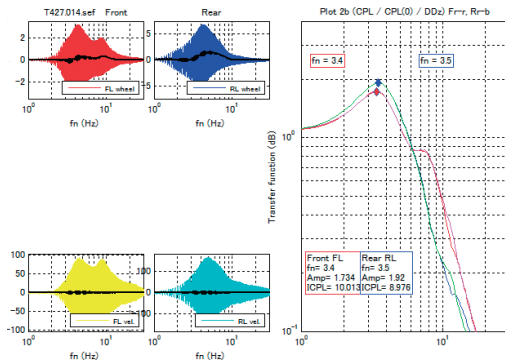


図8 a No12 イナーター無し

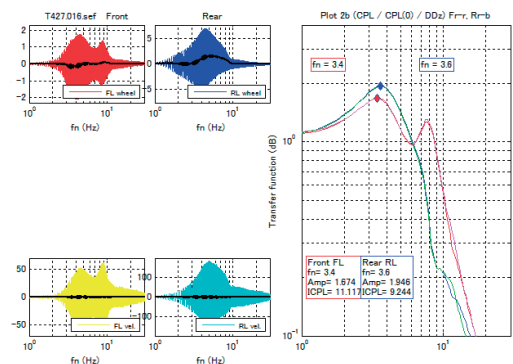


図8 b No14 実戦イナーター

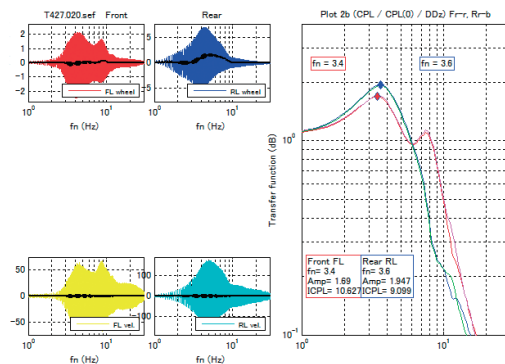


図8 c No18 NAC 製イナーター

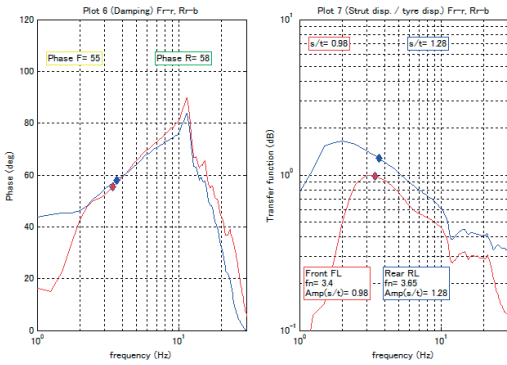


図9 a No12 イナーター無し

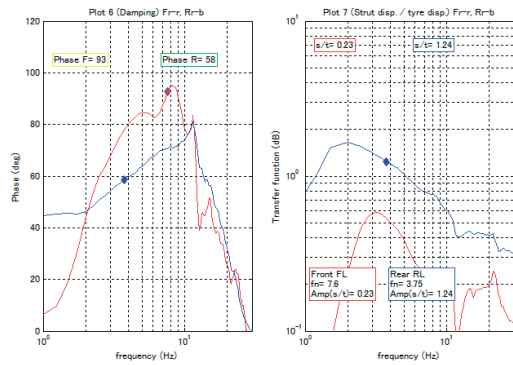


図9 b No14 実戦イナーター

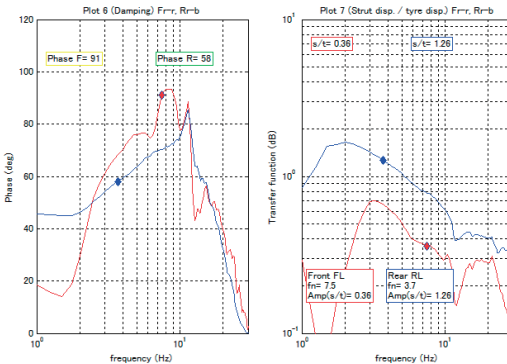


図9 c No18 NAC 製イナーター

色はフロントを水色はリアを表す，右側のボード線図は赤と緑のグラフ（前後の車体の加速度）を応答関数で表したものでありグラフ右の中の赤線はフロント，緑線はリアの値を示す。

加振機からの入力 \sin 波で，1 Hz \sim 30 Hzであり，この時の加速度をグラフにしたものである。

No12とNo14のボード線図を比較すると，7 Hzから8 Hzの間に新たに極値が現れた結果となった。この部分がイナーターの作動域になり，縦軸から読み取れば 10^0 dB付近にあり，この値は高い周波数域でも入力と出力のバランスが取れているといえる結果に思えたが，しかし，ポストリグ試験でお世話になった富樫氏の見解では，フロントとリアのグラフが重なることにより車体の前後の動きが合ってくる。この状態ではフロントの減衰が効き過ぎているという事であった。

このことは，試験結果を図8に示したNo18（NACイナーター）での結果にも現れており（図9 a,b,c）にもフロントの減衰が効き過ぎていることが現れている。

（図9 a,b,c）の測定結果は2つのボード線図で表され，左側のボード線図は減衰力の強さを表し，右側はタイヤとサスペンションの動きの比をTest NO12,14,18について表している。どちらの線図も赤線がフロントについて，青線がリアについて示している。

まず，左側ボード線図が表す減衰力の強さであるが，線図の中の赤線（フロント）に注目する

と NO12 に対し、NO14 では 2 Hz 付近から減衰力が強くなってきている。NO18 の場合も 2 Hz と 3 Hz の中間から強くなり始め 10 Hz を超えたところでは、弱くなっている。又、右側ポート線図のタイヤとサスペンションの動きの比であるが、縦軸の 10^0 が比率が 1 : 1 になって理想的であるのに対し、縦軸の最下に示す 10^{-1} になるとタイヤが振動を吸収し、サスペンションが動いていないことになる。

(図 9 a) のイナーター無しでは 3 Hz ~ 4 Hz の間にフロントを現す赤線が 10^0 付近にあり、タイヤとサスペンションの動きの比が理想に近いのに対して、(図 9 b) の実戦イナーターでは、赤線が、3 Hz ~ 4 Hz の間で約 4 dB 低い、(図 9 c) NAC 製イナーターでも同じ周波数域でイナーター無しに比べて 3 dB 低い結果が得られた。

この結果から、今回 S-FJ にイナーターを取り付けたことにより、フロントの減衰が効きすぎで振動を吸収できなくなり、その分タイヤが吸収した事になる。

本来イナーターの求めている性能と真逆の結果になってしまった。

5. 今後の課題

今回のポストリグ試験結果からイナーターを取り付けることにより減衰力が高くなりすぎ、サスペンションが動きにくくなった、これは、S-FJ に取り付けられているダンパー自体がイナーター無しですでに最適化されているからである。イナーターを取り付けることを前提としたダンパーの減衰を見出す必要がある。

今回、理論値と、測定値を結びつけるための計算を行うつもりであったが、残念ながら本学のダンパーの減衰係数の測定値がなく、計算を行うことはできなかった。

次回は、本学のダンパーの減衰係数を測定し、今回の測定データと照らしあわせながら、改良させたイナーターを製作したい。

また、ポストリグ試験では減衰力が強すぎた結果となったが、サーキット走行にはどのような結果になるのか興味深い点である。こういった点についても今後、検証していきたい。

6. おわりに

イナーター試作および、ポストリグ試験に当たり、はじめにも述べたようにイナーター自体が入手困難で、レーシングチームの中でも機密性が高いパーツであり、部外者が見ることも困難な状態で製作からはじめなくてはならなかったが、設計開始直後から本体部分になるはずみ車の支持方法、製作時の注意点など、TEAN DANDELION RACING の吉田監督、また、ポストリグ試験の時には試験評価で富樫氏、Team Le Mans の森本氏、と多くの方々からご教示いただきました。ここに謝意を表します。また、製作時にご協力いただいた鈴木美記郎先生に深謝します。

今回の研究は、まだ、未完であり通過点と考えていますが、結果を導き出すためには更なる専門知識が必要になり、自己の努力は当然だが、多くの方の意見も仰ぎたい。

参 考 文 献

- 1) Malcolm C, Smith, Fellow, IEEE, Synthesis of Mechanical Networks;The Inerter (IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL,VOL.47,NO.10,OCTOBER2002)
- 2) 竹原 伸 初めての自動車運動学, 森北出版, (2014)
- 3) 大熊 康弘 図解でわかるはじめての電気回路, 技術評論社 (2000)
- 4) 猪俣 志夫 Auto Cad LT 逆引きリファレンス, ソシム (株) (2016)
- 5) HP わかりやすい高校物理の部屋, <http://wakariyasui.sakura.ne.jp/>
- 6) HP GP TECHNICAL, <http://www.fltechnical.net/>
- 7) HP 富樫研究所, <http://a011w.broad.jp/cantalwaysget/index.html>
- 8) HP NSK 精機製品, <https://www.jp.nsk.com/products/precisionmachine/ballscrew/>
- 9) HP 機械技術者の自己啓発支援講座 (第19回), <http://www.washimo-web.jp/Technology/Statics/No19/Statics19.htm>
- 10) HP Racecar engineering, <http://www.racecar-engineering.com/articles/fl/understanding-the-j-damper/>
- 11) HP ばねます日記, <http://banemasu.blogspot.jp/2014/11/2.html>