

学生フォーミュラ仕様の吸気系について

学生フォーミュラのルールに合致した吸気系を持った、
600cc4気筒エンジンの内部EGRについて

1. 学生フォーミュラのルール	2
2. 実験の動機	3
3. 実験開始後直ぐ分かったこと	4
4. 実験方法	5
5. 計測結果	
5-1 計測結果概要	11
5-2 全開性能比較	12
5-3 内部EGR計測結果	13
5-4 酸素濃度計測結果	14
5-5 スロットルレスポンス比較	16
5-6 2次エアーの効果	19
6. バルブタイミング変更方法	21
7. 実験時の注意事項	28
8. 燃焼解析システムの紹介	29

川崎重工	MC&Eカンパニー	技術本部	技術管理部	技術管理課	本田篤
				2018-11-12	初版
				2018-12-13	改訂

1. 学生フォーミュラのルール

- 学生フォーミュラ(略称FSAE)のエンジンは、吸気系最上流に1個のスロットル、その下流に内径20mmのリストリクターを備えなければならない。その下流にサージタンク、そして各気筒に分かれた吸気マニフールド・インジェクターボディを備える。吸気系以外のエンジン本体は、量産車と根本的構造は異なる。
- 量産二輪車の吸気系は、エアクリーナボックス下流にマニフールドと4連スロットルを持つ。同様に吸気リストリクターを装着する4輪F3のレース車とはスロットル位置が異なっている。

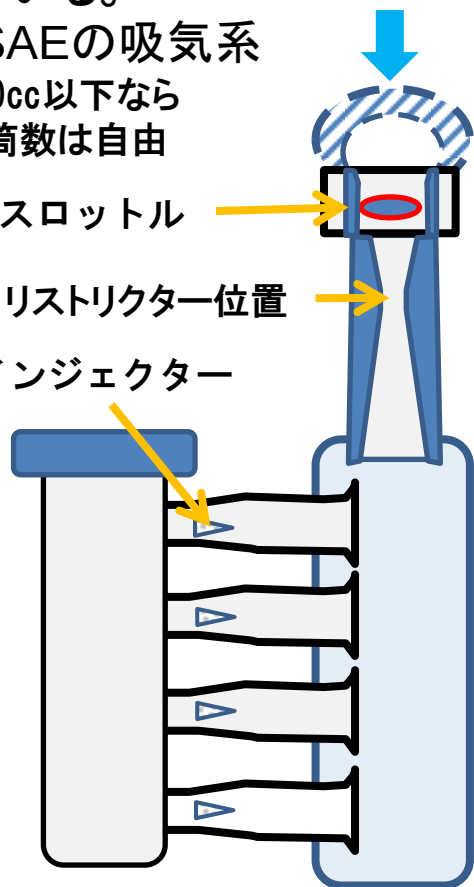
FSAEの吸気系

710cc以下なら
気筒数は自由

1 スロットル

D20 リストリクター位置

インジェクター

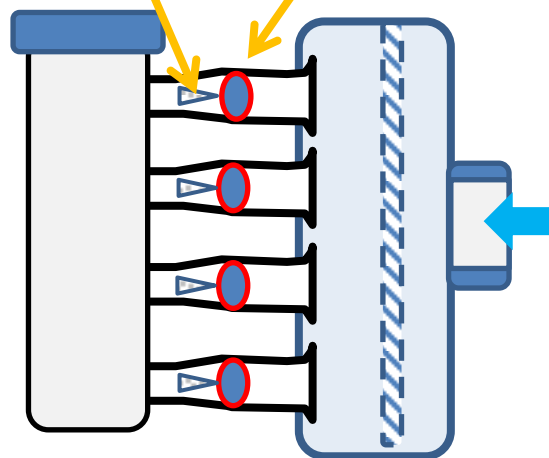


量産二輪車の吸気系

単気筒～4気筒まですべて
マルチスロットルです

4連スロットル

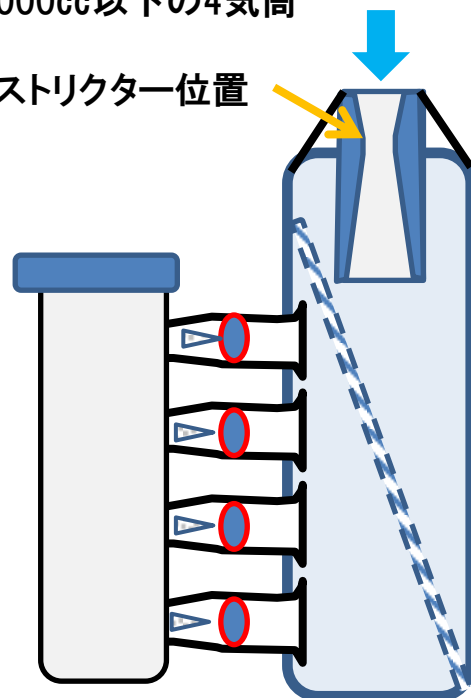
インジェクター



4輪F3レース車の吸気系

2000cc以下の4気筒

D28 リストリクター位置



2. 実験の動機

- FSAE車の4気筒は、約4000rpm以下ではアイドリングできない。
- 2015年に騒音規制が変更され、アイドリング時の規制100dBが追加された時、
低回転でアイドル出来ないで、アイドリング騒音レベルオーバーで騒音検査に
パスできないチームが何校も出た。 →
これが、この問題に取り組む直接のきっかけになった。
(FSAEのルールは、2017年に103dBに緩和、2019年も継続されている。)
- FSAE車ほぼ全車、エンジンレスポンスが悪く、コーナー脱出時にアクセルを
踏んでもワンテンポ遅れて加速が付いてくるように見える。
低速で穏やかに、スムーズに走れない。
- 学生たちのECU・セッティングツール等が良くないのか、
学生たちの技術力に問題があるのか、
それともFSAE吸気系に改造すると、上記のことが起こることは
避けられないのか、だとすれば原因は何か、を調べようと実験を開始した。

3. 実験開始後直ぐ分かったこと

バルブオーバーラップが大きく4連スロットルを持つ、レース用に近い二輪車用600cc4気筒エンジンを、吸気系最上流の1個のスロットルとその下流に $\Phi 20$ mmリストラクターを義務付けるFSAEルールの吸気系に合わせる時に**不可避の問題**である。

メーカーなら、バルブオーバーラップを少なくするためカムを作りかえるが、学生には簡単ではない。

私がやっても、

- ・およそ4000rpm以上でないとエンストしてしまう
- ・ECUセッティングも結構難しい

これでは、セッティングだけでアイドリング騒音(当時の規制値100db)を通すことは難しかっただろう。

しかし、吸気系入口のワンスロットルを全開で固定し、4連スロットルでコントロールすれば、 $\Phi 20$ リストラクターが付いていても、1500rpmでアイドル出来る。

学生が下手だったのではなく、FSAEルールに従うと不可避だったのである。

その原因を探るため、以下の実験を行った。

4．実験方法

FSAE吸気系で起きている現象の原因を、吸気系最上流にスロットルが有るため、スロットルが全閉に近い時にサージタンク内が大きな負圧になり、バルブオーバーラップ時に排気系から逆流した排気ガスがサージタンク内まで充満するためと考え、そのことを証明するための実験を行った。

通常 quantity 仕様に内径20mmの吸気リストリクターを追加し、スロットル位置を切り替え、加速、減速の運転を行う。燃焼解析で性能を把握し、吸入空気流量、サージタンク内の空気成分を計測する。バルブオーバーラップの影響を比較するため、カムタイミングの変更を組み合わせた。仕様変更で、起きている現象を定量的に捉えようとした。

その実験を進めていく中で

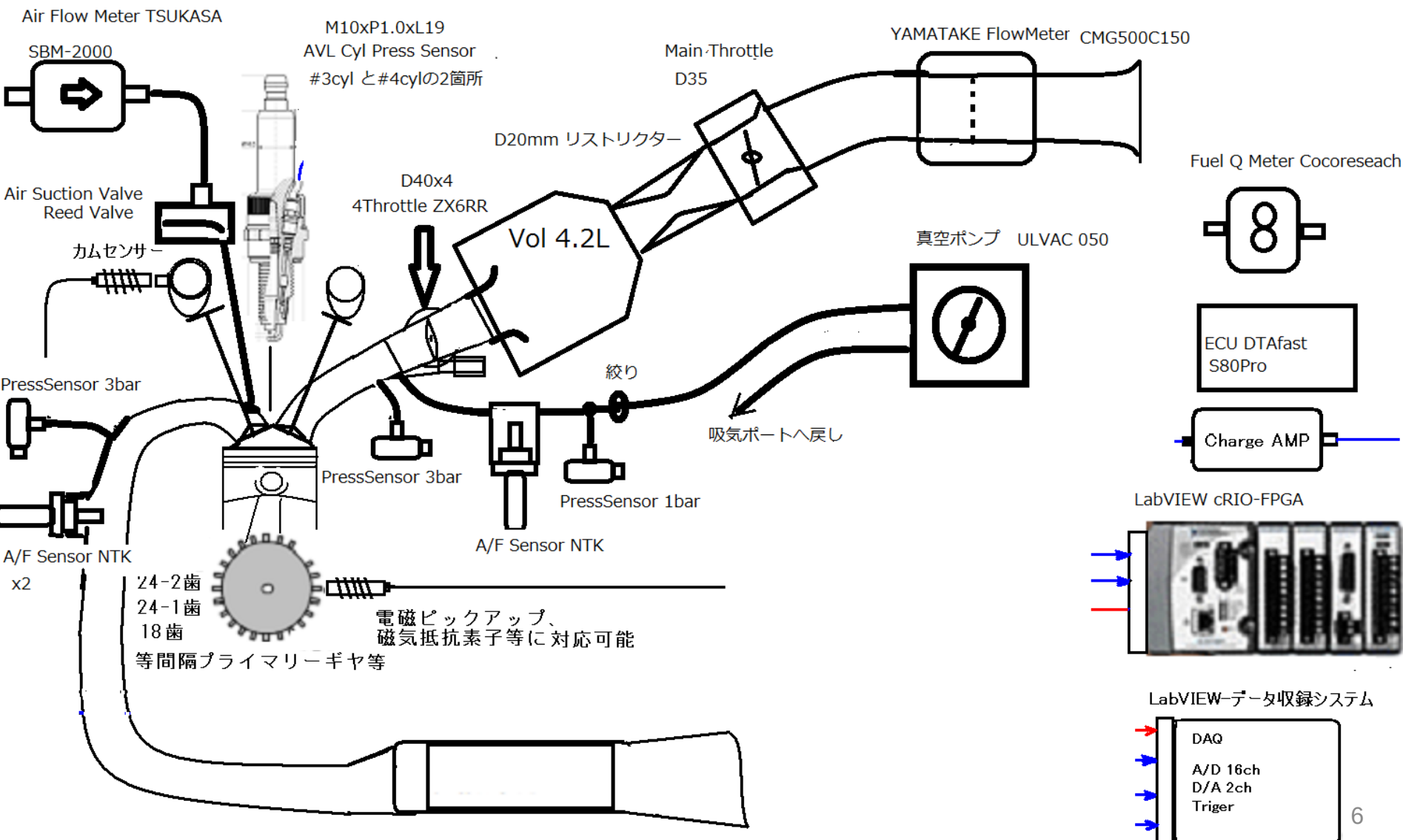
- ・ 4気筒エンジンは他の3気筒のオーバーラップ時の逆流分が影響しているのか。
- ・ 2気筒ではこの問題が起こりにくいのか。
- ・ 単気筒で起こらないのか。
- ・ 本当にどこまで逆流しているのか。

等、解明したい問題は有るが、今回は4気筒に限定して実験を行った。

4-1 計測システム

① 計測システム全体

燃焼圧解析システム概略図



② シリンダヘッド部のセンサーと関連デバイス

2次エアーASVとon/off切替バルブ(量産品)

AVL燃焼圧センサーは
#3cylと#4cylの2本のみ



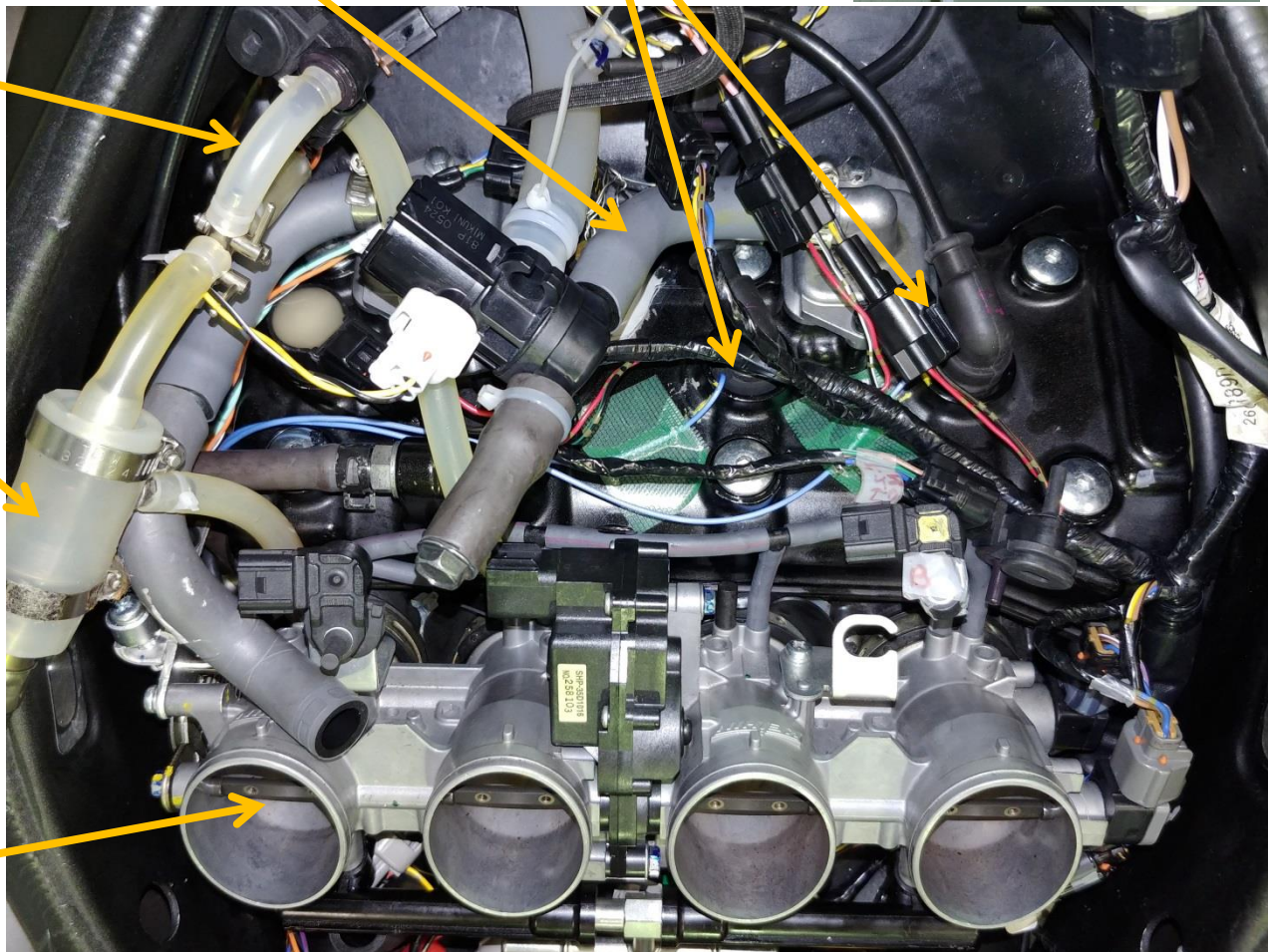
ASVの流量計

真空ポンプへ繋がるチューブ内の負圧を計測する。

#1cyl吸気ポートの空気を
サンプリングしてすぐ
A/Fセンサーで計測する。
(シリコンチューブ入り)

真空ポンプへは絞り付の
バルブとチューブでつな
がっている。

量産の4連スロットルは、
全開固定か、制御するか
を切り替える。



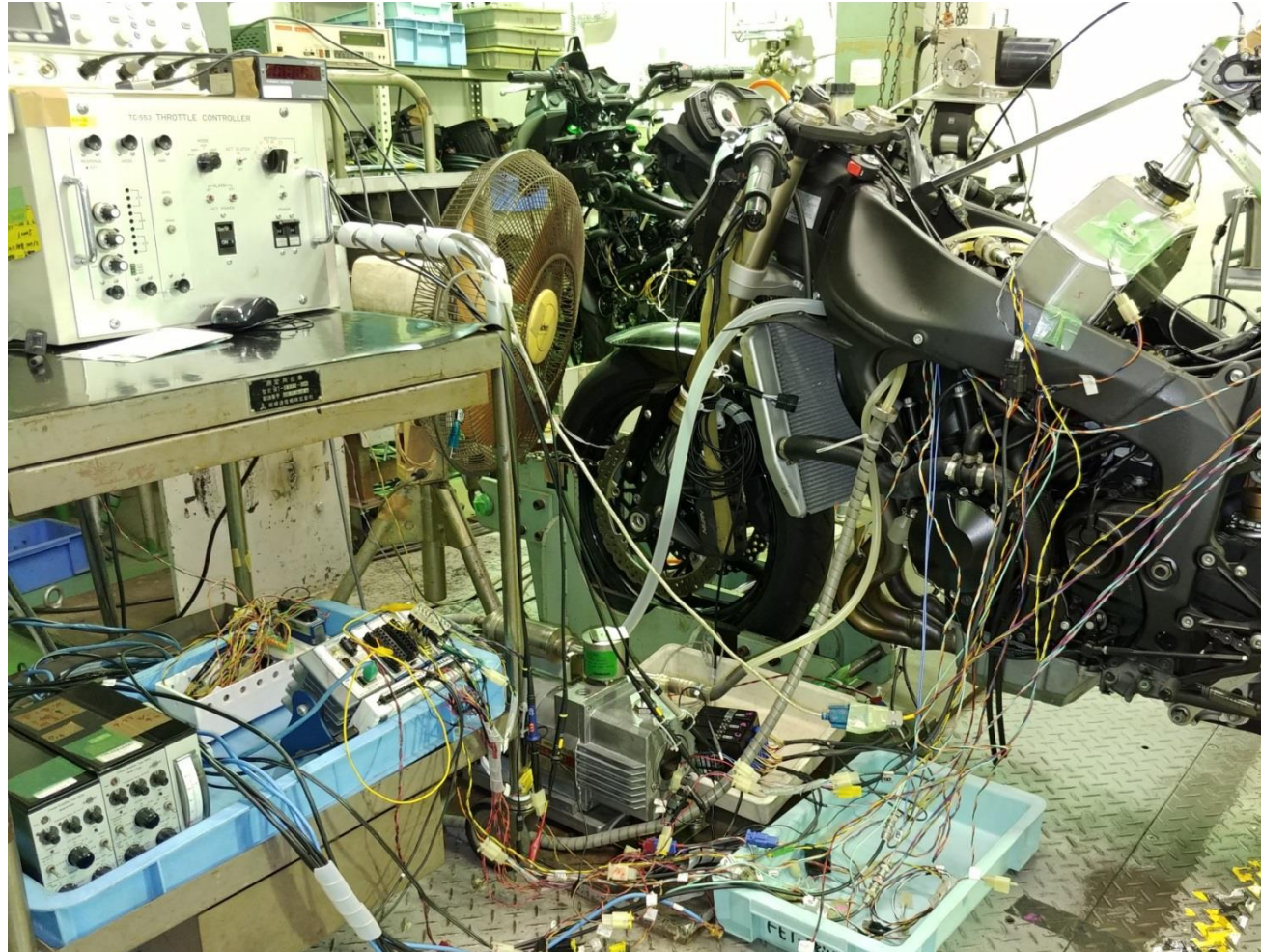
③ テスト環境 車両、シャーシダイナモ

ダイナモの定格容量はmax37kW 速度150km/hまで。
等価慣性質量 120kg～400kg相当
実験はFSAEを想定して300kgとしている。

20mmのリストリクター付
でも連続定格容量を超える
ためテストは過渡運転
で計測を行っている。

燃焼解析のシステムは
スロットルアクチュエータ
のプログラム運転も行う。

使っているプログラムは
LabVIEW cRIO-FPGA
並列プログラミングが作り
やすいので必要に応じて
機能追加できる。





0

0ch-PressCyl4

1ch-Boost4

2ch-ExhPress

3ch-IGT4-3

4ch-EngRPM

5ch-CrankA

6ch-CrPuls

7ch-AF4-D

8ch-PressCyl3

9ch-TPS

10-AFS.Boost

11-AF3-D

12-AFO2-INport

13-ASVx2-g/s

14-Air-IN-g/s

15-FuelQ-cc/m x10

16-DynSP-km/h

17-DynTrq-kgf-m

4-2 計測チャンネルと運転パターン

・計測チャンネルは右図

・運転パターン:

4000rpm→14000rpm→4000rpm→14000rpm→
の加速・減速の繰返し(下図緑線)

・スロットル開度調整:

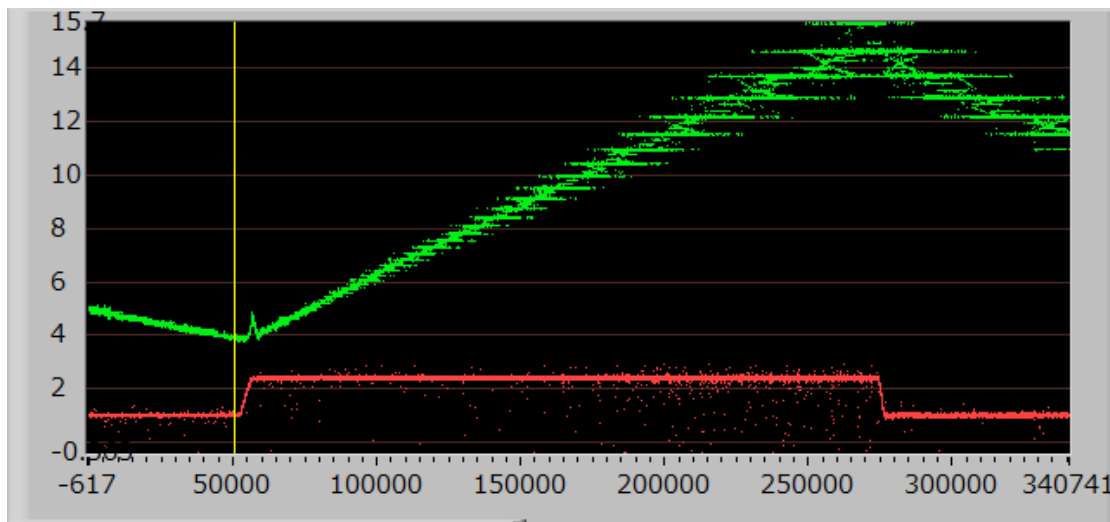
スロットルアクチュエータで指定開度に調整(下図赤線)
指定開度は、ECU(DTAfast)のMapの刻み

・走行抵抗:

仮想のFSAE設定、等価慣性質量 300kg

・燃焼圧計測: #4cyl #3cyl(4気筒の右半分)

・排気A/F計測: #4cyl #3cyl(4気筒の右半分)



4-3 テスト仕様の組み合わせ

エンジン仕様
ベース
ZX6RR 2012年モデル
B 67x S 42.5 4気筒
599mL

すべてD20リストリクター付

カムセンサー追加

ECU DTAfast S80
インジェクターは1本/cyl

- カムタイミング 2種
- ・STD カムタイミング:
STD Cam Timing → **SCT** と略
 - ・オーバーラップ小に改造した仕様
Cam Timing Modify → **CTM** と略

- スロットルボディ 2種
- ・1スロットル(FSAE仕様)→**1TB**と略
 - ・4スロットル(ZX6RR) →**4TB**と略

- 2次エアーシステムの有無 2仕様
(Air Suction Vave System)
- ・有 → **ASV** と略
 - ・無し → **NoASV** と略

5 . 計測結果

5-1 計測結果概要

- ① バルブオーバーラップの大きな仕様は、内部EGRが多めになる。
- ② 吸気ポートからサンプリングした空気の酸素濃度は、低回転での加速時には10～40%の低下がある。減速時は50%まで酸素濃度が低下している。
- ③ 学生フォーミュラ仕様(吸気系最上流部のワンスロットルと、その直ぐ下流のΦ20絞り)は、量産車標準状態の4連スロットルに比べ、レスポンスを悪化させる。
- ④ 二次エアーシステムを作動させると低回転でアイドル出来るようになる。

5-2 全開性能比較

STDのカムタイミング(SCT)で4スロットル(4TB)が性能がBest(茶色)

ASVの有り無しは性能に差はない。

SCTは6000-7000rpmに大きなトルク谷がある。

カムタイミング改造のCTMは出力的に見るとパワーはやや低い。

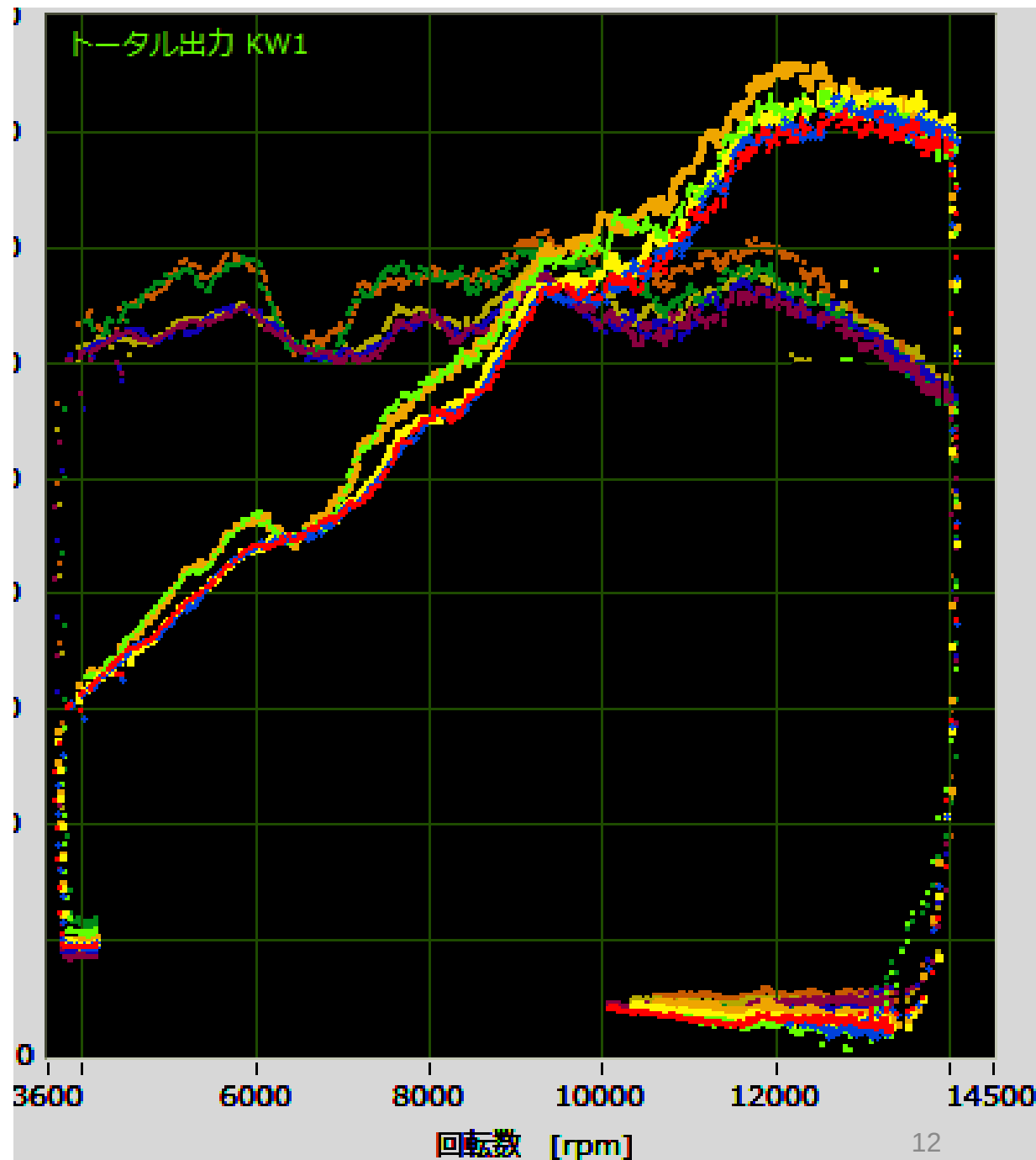
¥CTM-1TB-NoASV-T96_1424

¥CTM-1TB-ASV-t96_1458.txt

¥SCT-1TB-ASV-t96_1342.txt

¥CTM-4TB-ASV-T96_1406.txt

¥SCT-4TB-ASV-t96_2250.txt



5-3 内部EGR計測結果

$$\text{EGR}\% = (\text{Qin} - \text{Qex}) / \text{Qin} \times 100$$

$\text{Qin} = 600\text{cc} \times \text{吸気管部圧力}$

$\text{Qex} = A/F \times \text{Fuel}$

A/F : 排気管部 A/F センサーの値

Fuel : 燃料流量計の値

右図でスロットルを開ける直前手前(4200rpmから3800rpmに回転数が下がる辺り)を見ると、

①バルブオーバーラップ比較

1TBでも4TBでも、 **SCT > CTM**

オーバーラップの少ないCTMの方がEGRが少ないと言う当たり前の結果になった。

②スロットルボア数比較

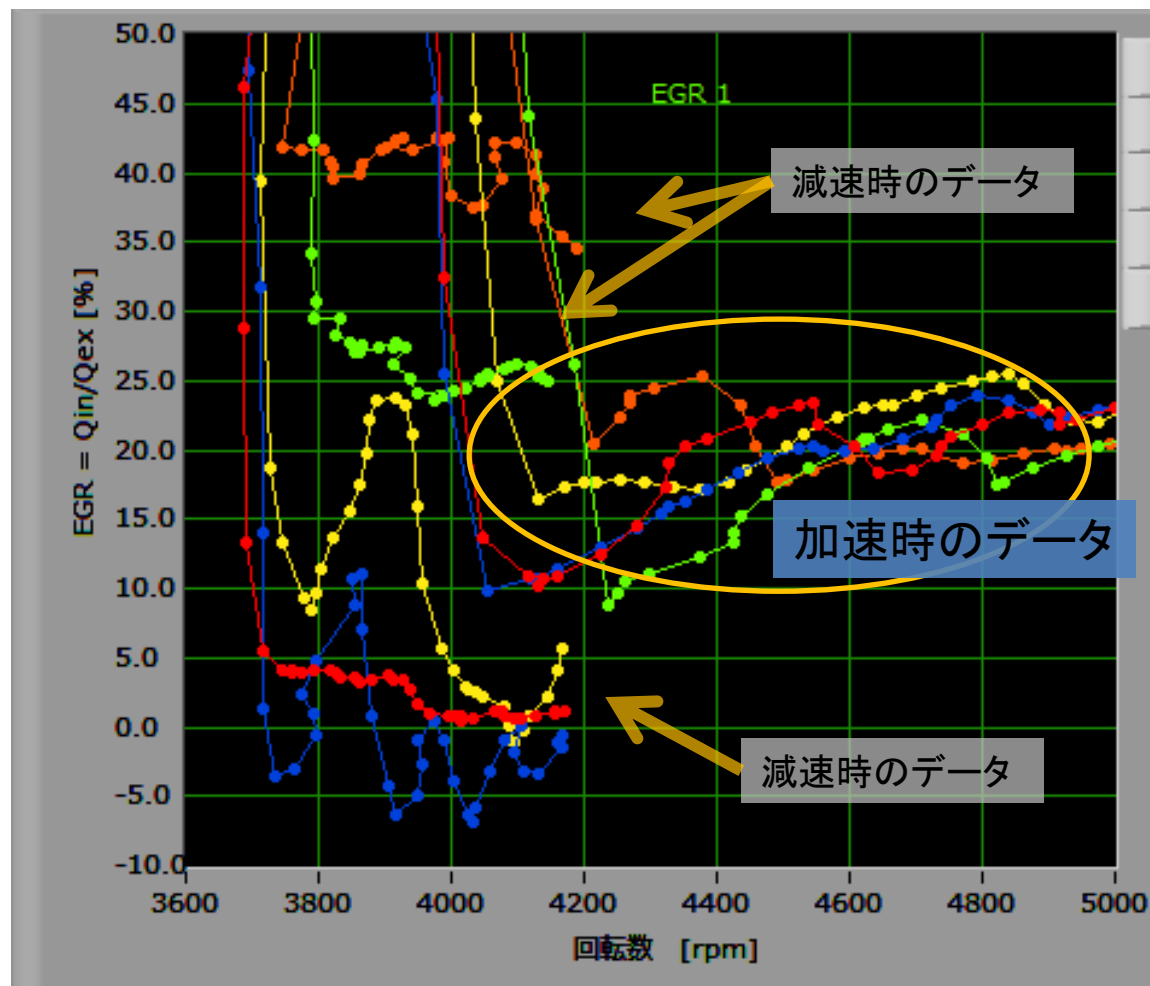
SCTでもCTMでも、 **4TB > 1TB**

4-5項のスロットルレスポンス比較で示すように、4TBの方が1TBよりもレスポンスが良いが、内部EGRも4TBの方が少ないという結果にはならなかった。

色別テスト仕様

1TBの場合にはサージタンクまで排ガスが逆流するので、サージタンク内のEGRガスが多いが、4TBの場合はEGRがスロットルバルブで遮られるためサージタンクまでは逆流できないと推定している。

サージタンク内からガスを取り出して計測する必要が有る。



¥CTM-1TB-NoASV-T96_1424.txt

¥CTM-1TB-ASV-t96_1458.txt

¥SCT-1TB-ASV-t96_1342.txt

¥CTM-4TB-ASV-T96_1406.txt

¥SCT-4TB-ASV-t96_2250.txt

5-4 酸素濃度計測結果

①吸気管部A/Fセンサーでの計測値の補正

(注、HCの成分は未計測)

- ・A/Fセンサーを吸気管に接続してみると、負圧でデータが変化することが分かった。
- ・大気(酸素濃度20.6%)を基準に真空ポンプで負圧にした、AFセンサー出力(酸素濃度%)をキャリブレーションした。
- ・その結果、O2%の計測値をセンサー室の負圧の値で割れば、負圧の影響を少なくして大体評価出来ると分かったので、
酸素濃度%/圧力
の値で比較した。

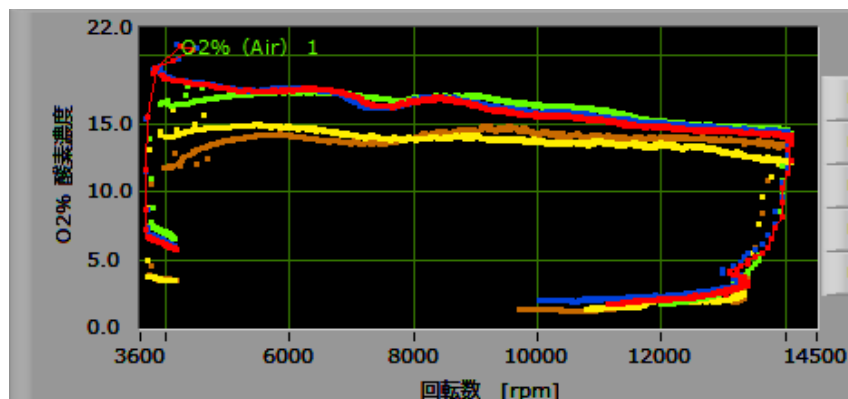
¥CTM-1TB-NoASV-T96_1424.txt

¥CTM-1TB-ASV-t96_1458.txt

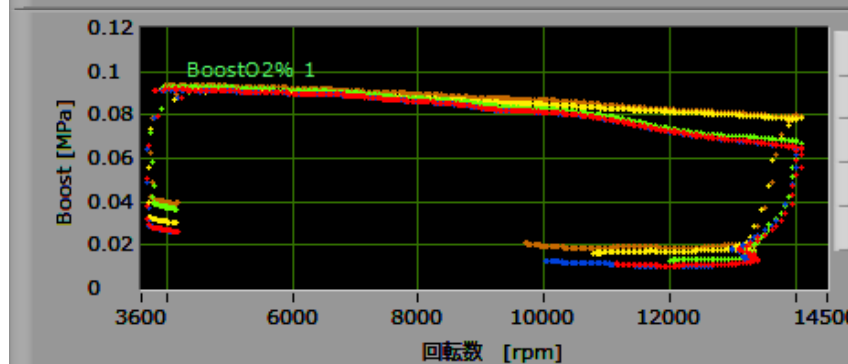
¥SCT-1TB-ASV-t96_1342.txt

¥CTM-4TB-ASV-T96_1406.txt

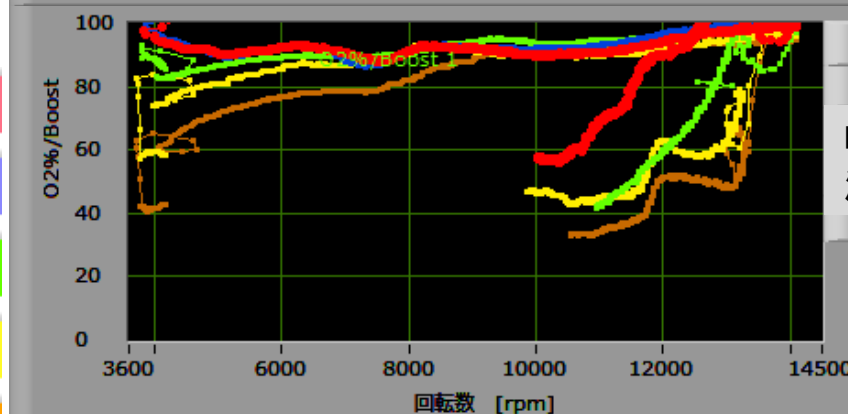
¥SCT-4TB-ASV-t96_2250.txt



A/Fセンサー
での計測値を



A/Fセンサー
室の圧力で割
り



吸気管部酸素
濃度率とした

② 酸素濃度計測結果：サージタンクまで排ガスが逆流しているか？ → 追加実験が必要、HC成分未計測

- ・吸気ポートからサンプリングした空気の酸素濃度は、加速時は10～40%低下している(下図黄丸部)。特に減速時は50%程まで酸素濃度が低下している(下図白丸部)。
→ 吸気ポートのサンプリング部までは、排ガスが逆流している。
- ・バルブオーバーラップの小さいCTMの方がSCTよりも酸素濃度低下が小さい。特に、1TBの減速時(図中白丸部分)の差は大きい。この時に緑はサージタンクに排ガスが溜まるが、(赤に隠れた)青は排ガスが溜まる量が少ないと考えられる。
- ・1スロットルは4スロットルより酸素濃度低下が少ない。4TBでは内部EGRがスロットルに邪魔されてサージタンクに逆流せず、計測位置での排ガス分が多くなり、酸素濃度低下として計測されているのかも知れない。(噴射したガソリンのHC成分で酸素濃度低下していることも考えられる。)
- ・しかし、加速時にも1TBの方が4TBよりも酸素濃度低下は小さい。
- ・サンプリングポイントを共通の位置を選んだためこのような結果となった。
今後はサージタンク内のガスをサンプリングする実験が必要である。

注：図中の青線が見えない部分は、赤線とほぼ重なっている。

色別テスト仕様

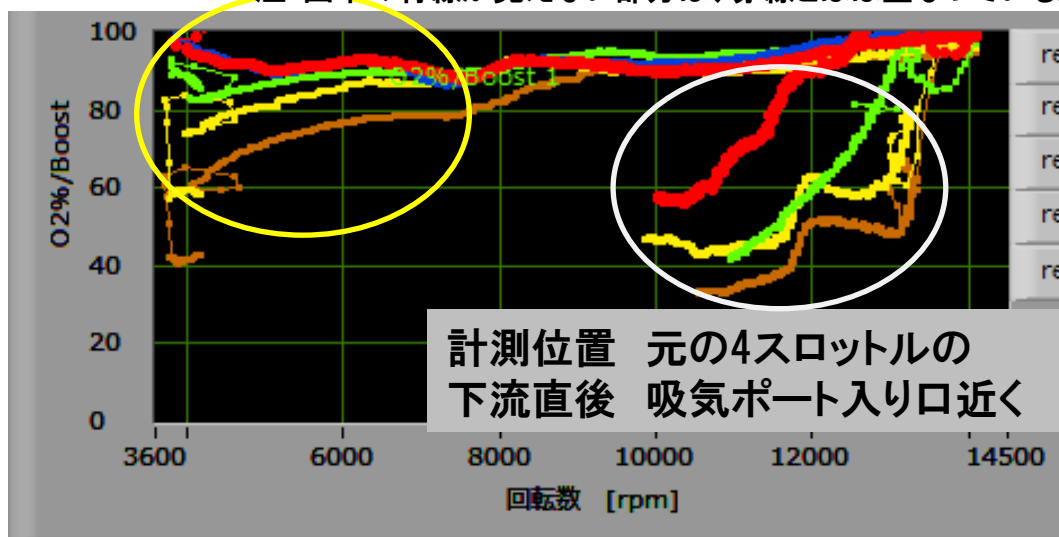
¥CTM-1TB-NoASV-T96_1424.txt

¥CTM-1TB-ASV-t96_1458.txt

¥SCT-1TB-ASV-t96_1342.txt

¥CTM-4TB-ASV-T96_1406.txt

¥SCT-4TB-ASV-t96_2250.txt



5-5 スロットル・レスポンス比較(スロットル開度をトリガーに比較)

色別テスト仕様

①出力の応答

スロットル開度をトリガーに比較している
明らかに4スロットルが応答が速い

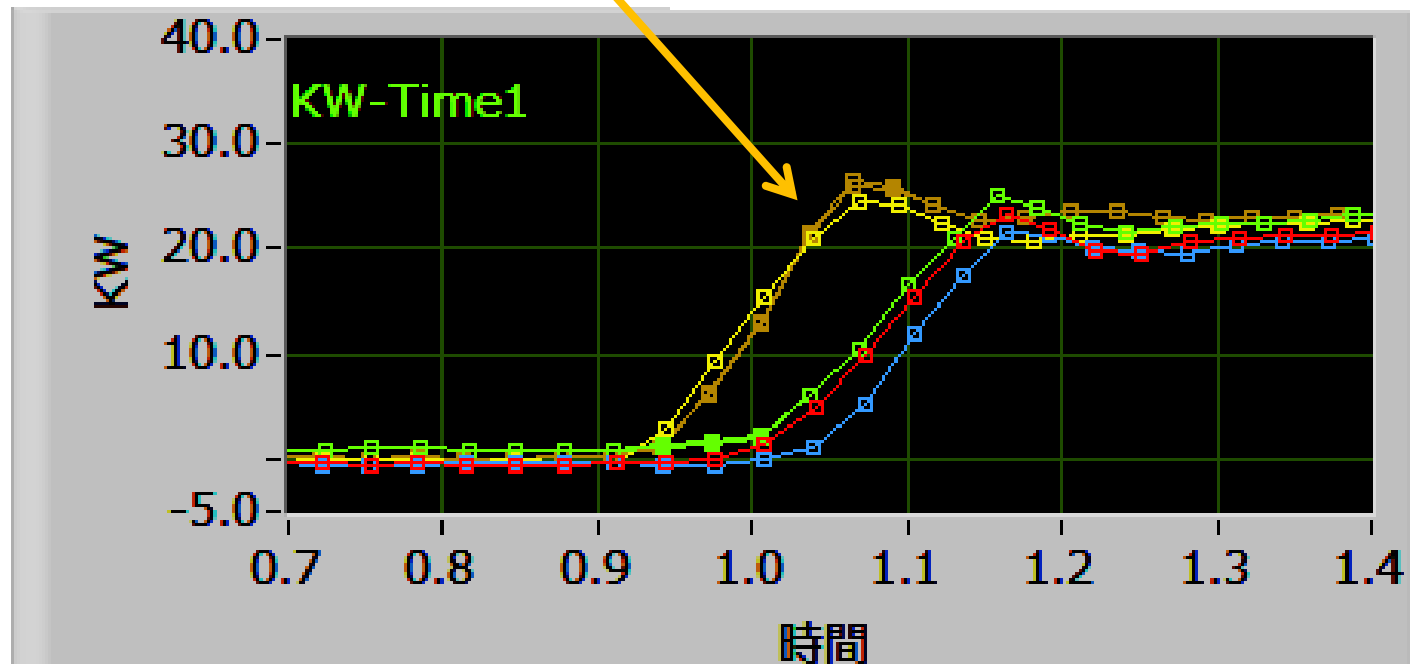
¥CTM-1TB-NoASV-T96_1424.txt

¥CTM-1TB-ASV-t96_1458.txt

¥SCT-1TB-ASV-t96_1342.txt

¥CTM-4TB-ASV-T96_1406.txt

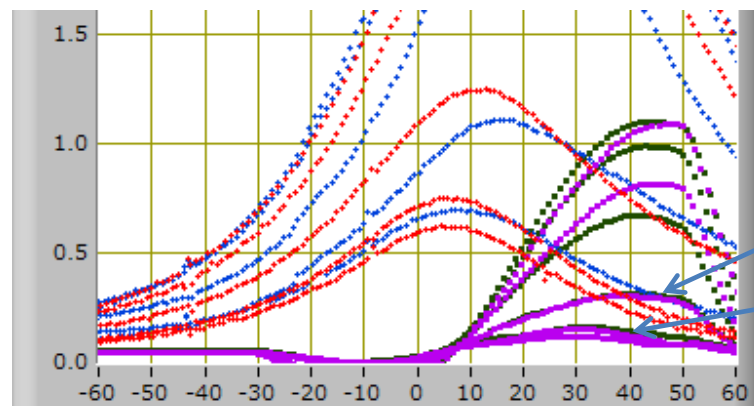
¥SCT-4TB-ASV-t96_2250.txt



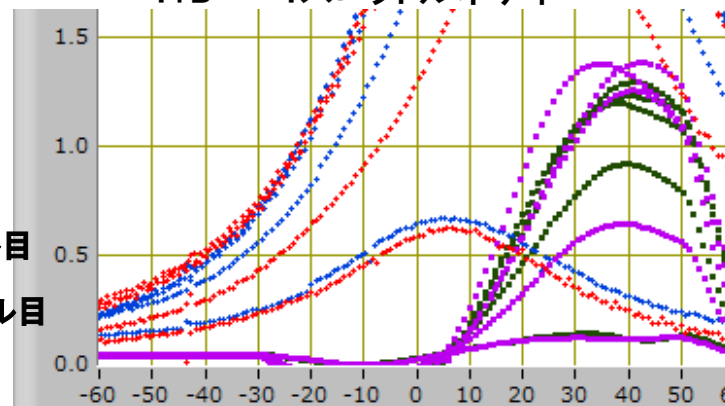
② 燃焼解析データを見る

1TBは、穏やかに4サイクル位かかってトルクが出る。
4TBは、2サイクル目で定常並み熱発生率を表す。

1TB = 1スロットルボディ



4TB = 4スロットルボディ

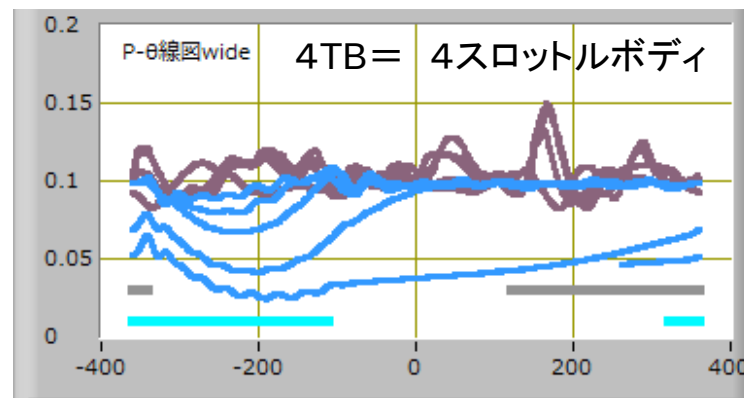
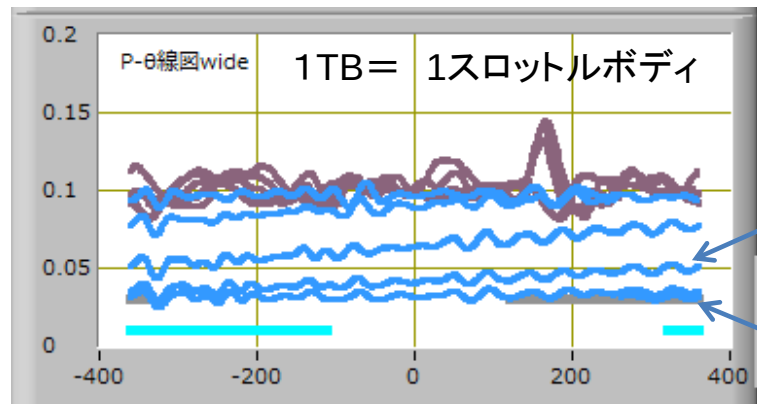


熱発生率のカーブ #3、#4cyl(黒・紫)

③ 吸気管部圧力(吸気圧波形(青)、排気圧波形(赤っぽい灰))

1TBは、穏やかに4サイクル位かかって吸気管部圧力が上がる。

4TBは、2サイクル目で定常並みの吸気管圧力まで上がる。



④考察

i) ①②③共、下記の2つが原因として考えられる。

a 内部EGRガスが溜まる容積の差

- ・内部EGRはスロットルより上流まで逆流しないとすると、4TBではスロットル下流容積はとても小さく、内部EGRガスはここにしか溜まらない。
- ・1TBではサージタンク容量分の4. 2Lと大きく溜まる容積が有るので、スロットルを開いても多量の内部EGRガスを排出してしまうまでは、応答しない。

b 単にスロットルより下流部の容積の差

そもそも内部EGRガスはそんなに多くはサージタンクに行かないとすると、1TBではスロットルから燃焼室までの容積が大きいので、スロットルを開いても直ぐには反応しない。

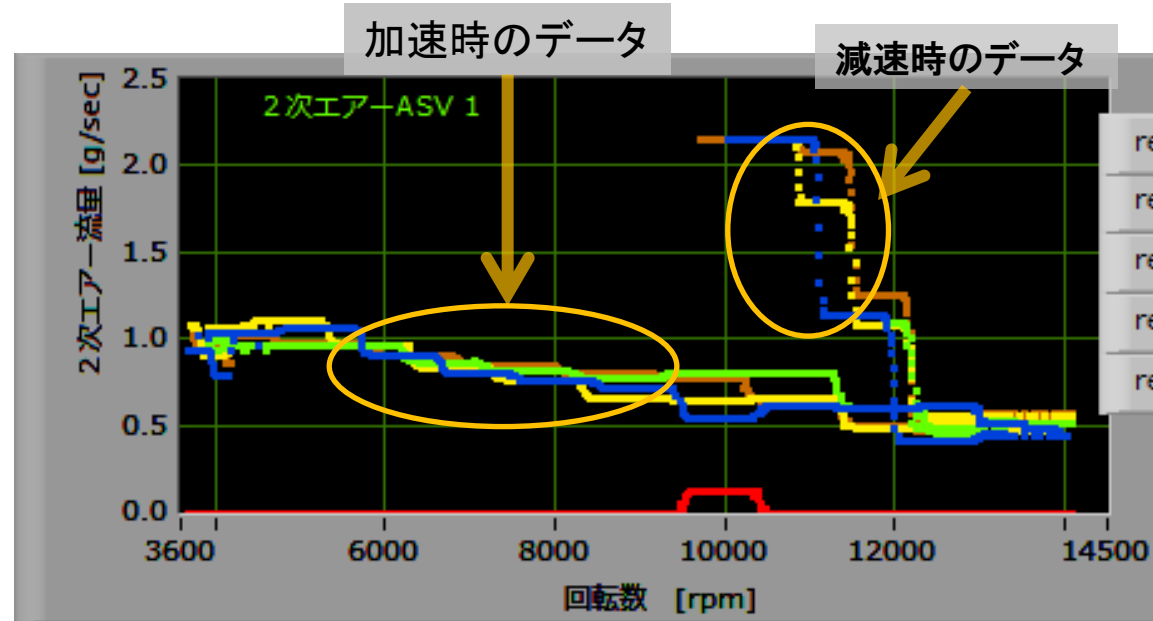
ii) しかし、今回の実験結果だけからではどちらか分らない。

ガスのサンプリングポイントを追加・変更しサージタンク内やスロットル上流部のガスを測らなければならない。ガスにはHC成分も含んでおり、酸素濃度だけでは表せない要素もある。

5-6 ASV (Air Suction Valve) 2次エアーの効果 アイドリング安定

①2次エアーシステムとは

- ・シリンダーヘッドカバー等に装着されたリードバルブにより、排気ポート内が負圧の時に大気を排気ポートに導入する。2輪車の排ガス対策に古くから使われている。
- ・量産車では、排ガスコントロール・ドライバビリティ・アフターファイヤなどの対策でON/OFF制御される。
- ・ASVを動作させるとA/Fが正しく計測出来なくなるため、学生フォーミュラでは通常は栓をし、塞いでいた。

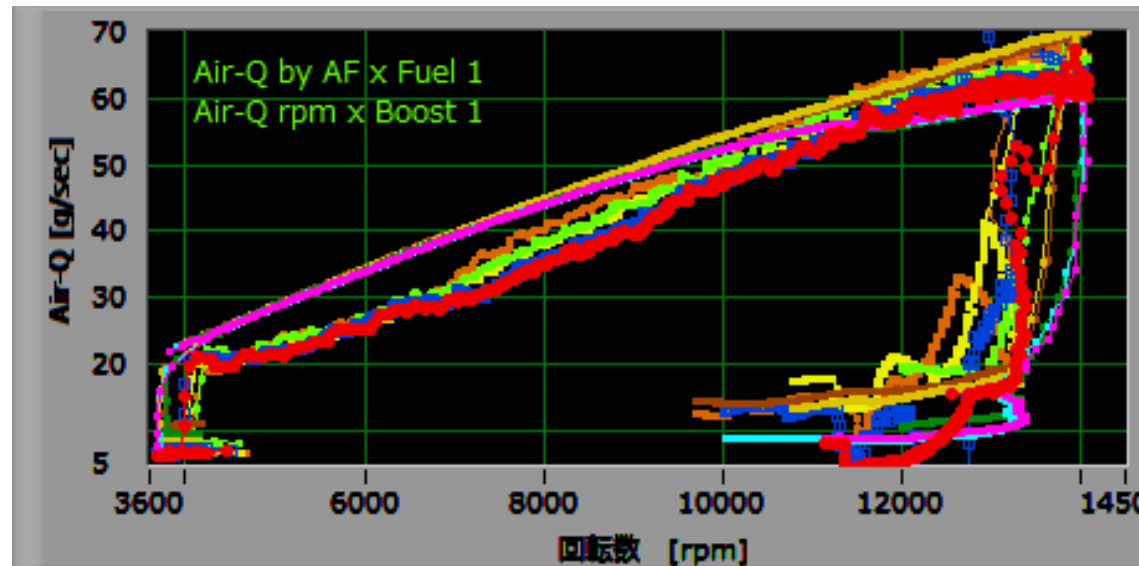


②計測結果

a 4気筒分の二次エアー流量: 右上図(3 cylと4cylを計測し、4気筒に換算)

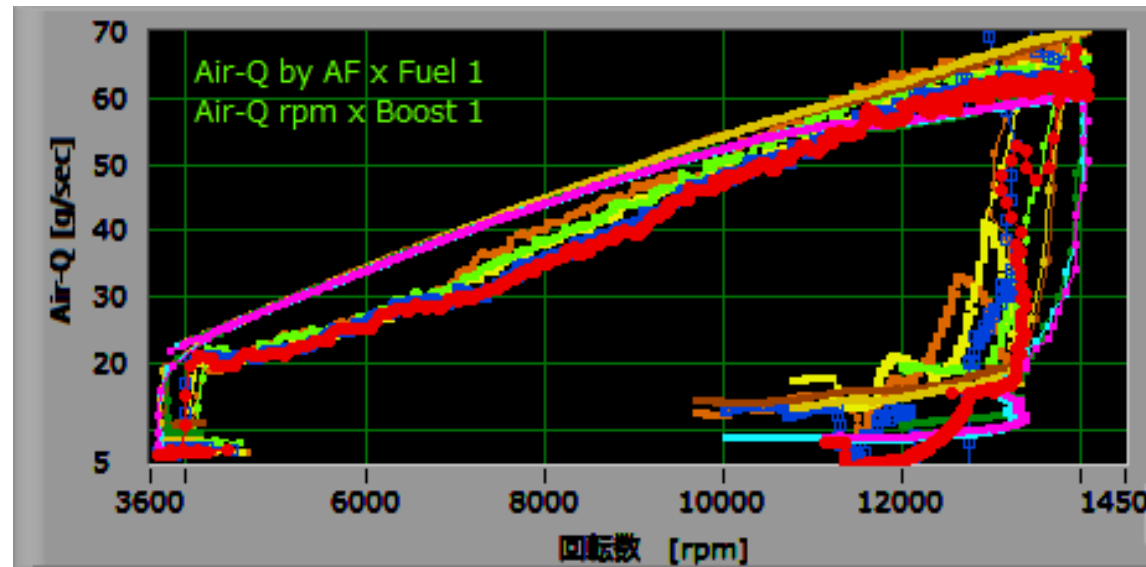
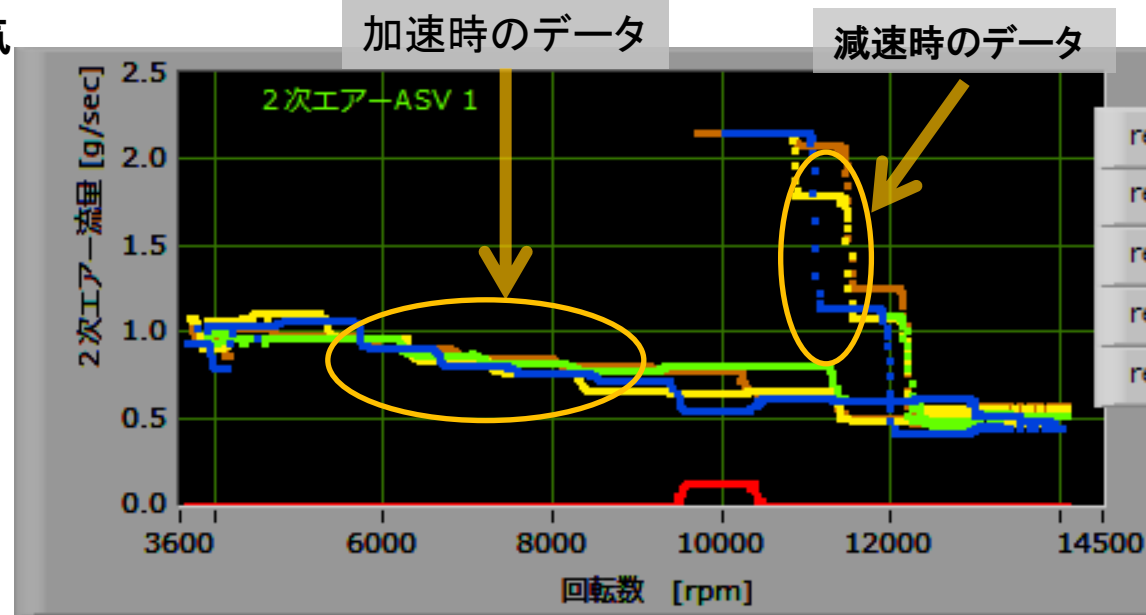
- ・低回転時は1g/sec 程度
- ・高回転で 0.5g/sec 程度
- ・エンジnbr레이크時は2.2g/sec程度

b 4気筒分の吸気流量: 右下図(エキパイ部のA/Fセンサー値とインジェクター流量からの計算値と、行程容積×ブースト圧の計算値: 変動の少ない方の線)



③考察（以下、このページの流量は4気筒当り、グラフは前頁と同じ物）

- ・全開高回転時の二次エア－流量の、吸気側からの流量に対する比率は、 $0.5\text{g}/60\text{g}=1/120$ 程度であり、出力に影響を与えるとは思えない。
- ・低回転時の二次エア－流量は $1\text{g}/\text{sec}$ 程度で、この時の吸気側からの空気流量である $7\text{g}/\text{sec}$ に対し、約 $1/7$ であり、回転の安定性や再加速時のレスポンスに有意な影響を与える可能性の有る量と思われる。
- ・ASVからの入った新気は排気管だけでなくEGRでシリンダ内部にも逆流するため、**アイドリングが安定する。**
- ・スロットルOFF高回転時は、二次エア－流量は $2.2\text{g}/\text{sec}$ 程度で、この時の吸気側からの空気流量である $13\text{g}/\text{sec}$ に対し、約 $1/6$ であり、回転の安定性や再加速時のレスポンスに有意な影響を与える可能性の有る量と思われる。



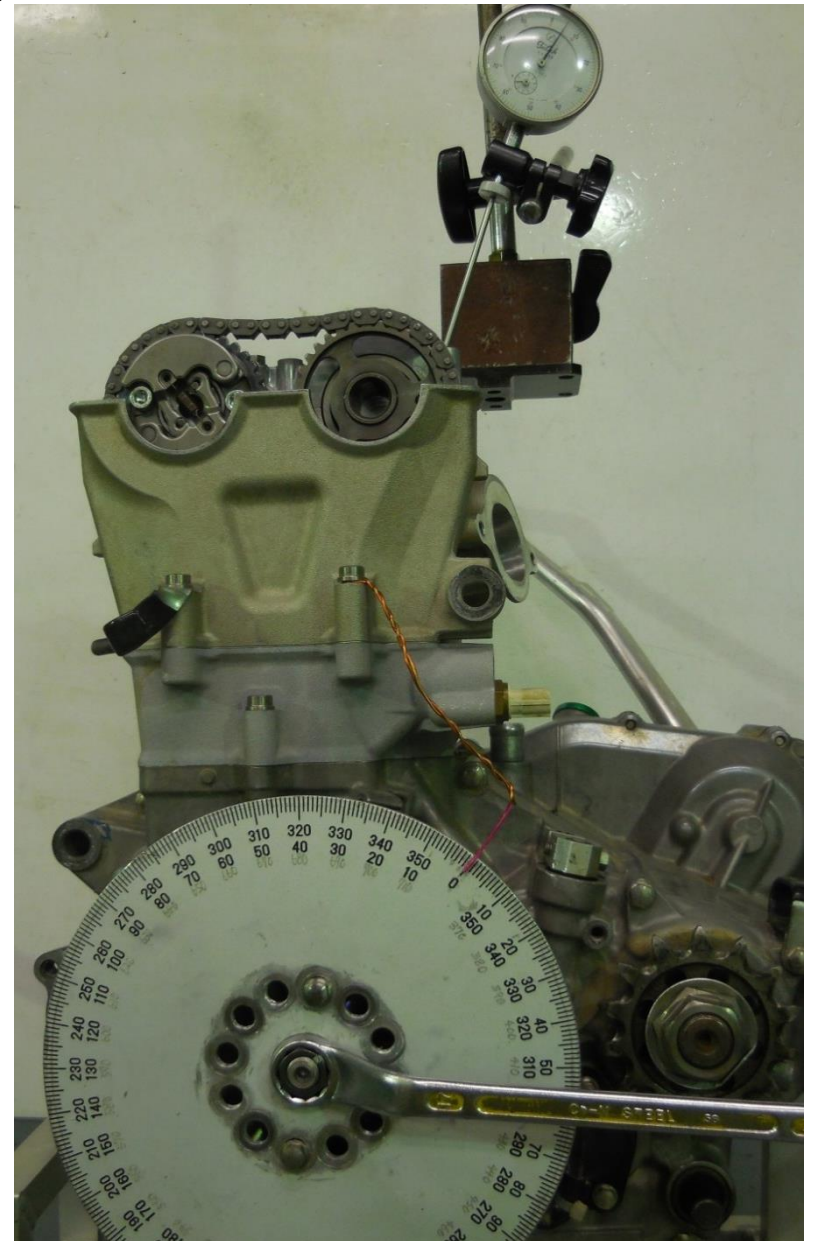
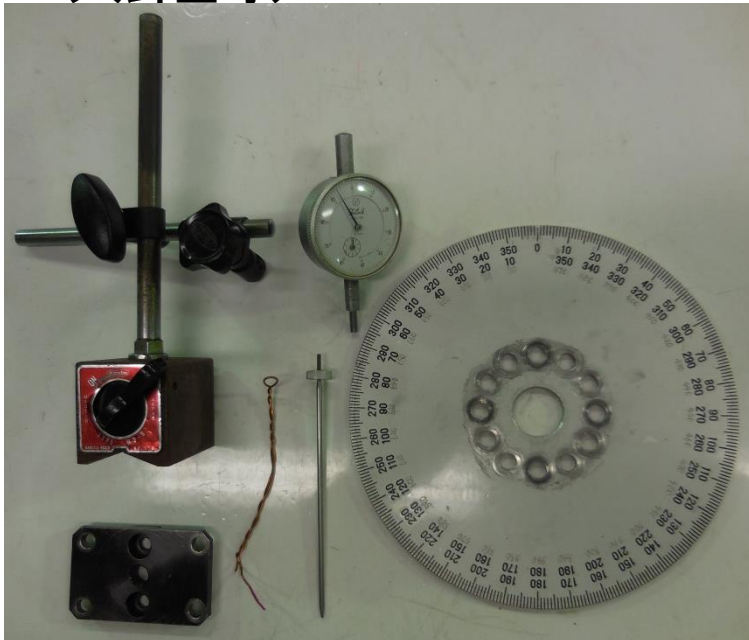
6 . バルブタイミングの変更方法

エンジン仕様の変更

①プロメカニックのやり方

必要な機材

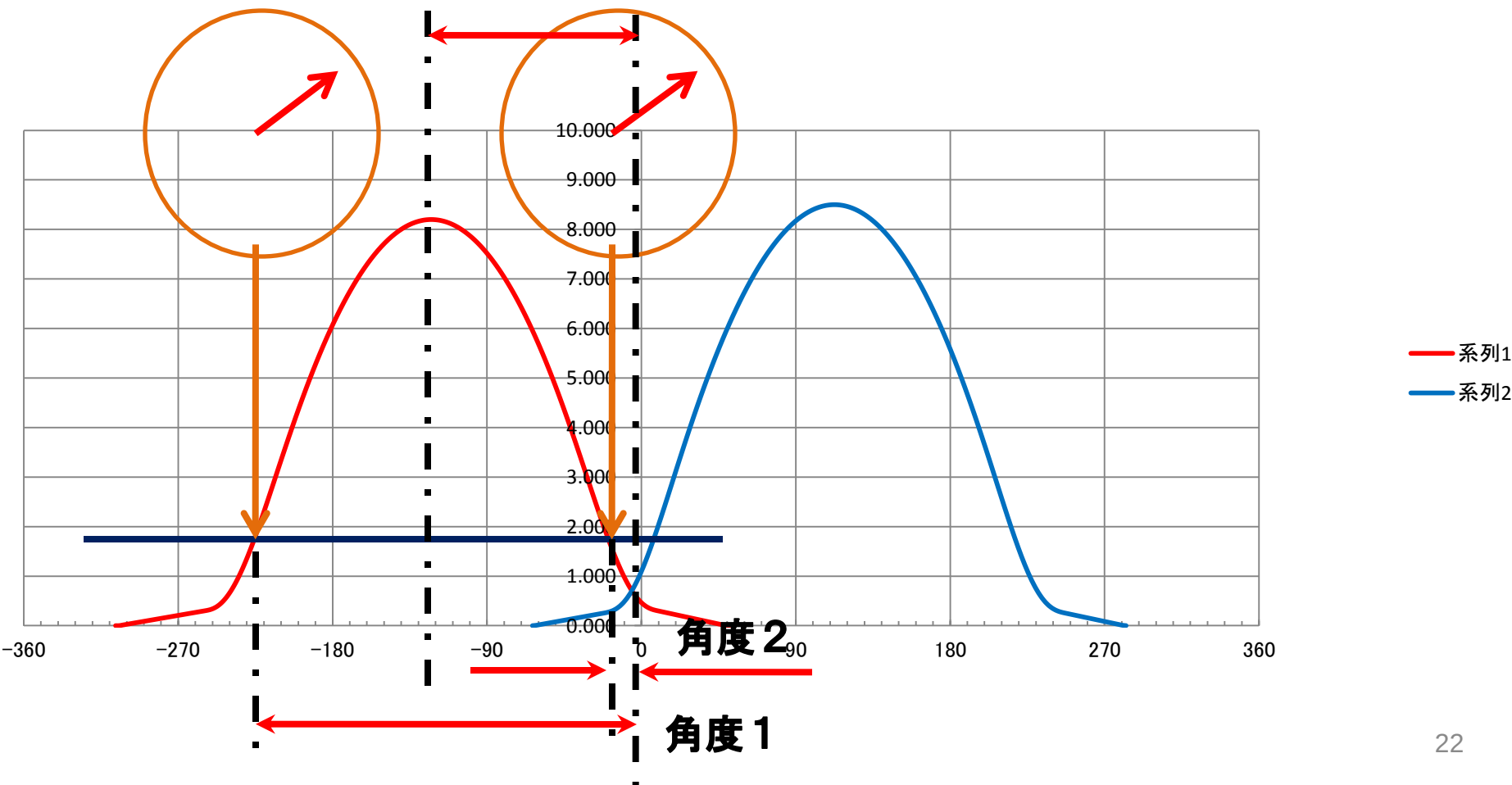
- 全円分度器
- ダイヤルゲージ
- 延長ニードル
- マグネットスタンド
- マグネットスタンド取り付けステー
- 合わせマーク(針金等)



TDCをしっかりと合わせ、最大リフトがダイヤルゲージの作動範囲に入っていることを確認する。
エンジンを回転方向に回し、1mm程度のリフトで、作動角を計測する。高さは1mmリフトに拘らなくても良いが、同じ高さであることが大切。上死点を合わせる時等なら、行き過ぎた時は少しなら逆転させても良いが、リフトを測る場合は正方向で行う。

この作業は、熟練を要する。学生たちでもできる方法を、次ページ以下に示します。

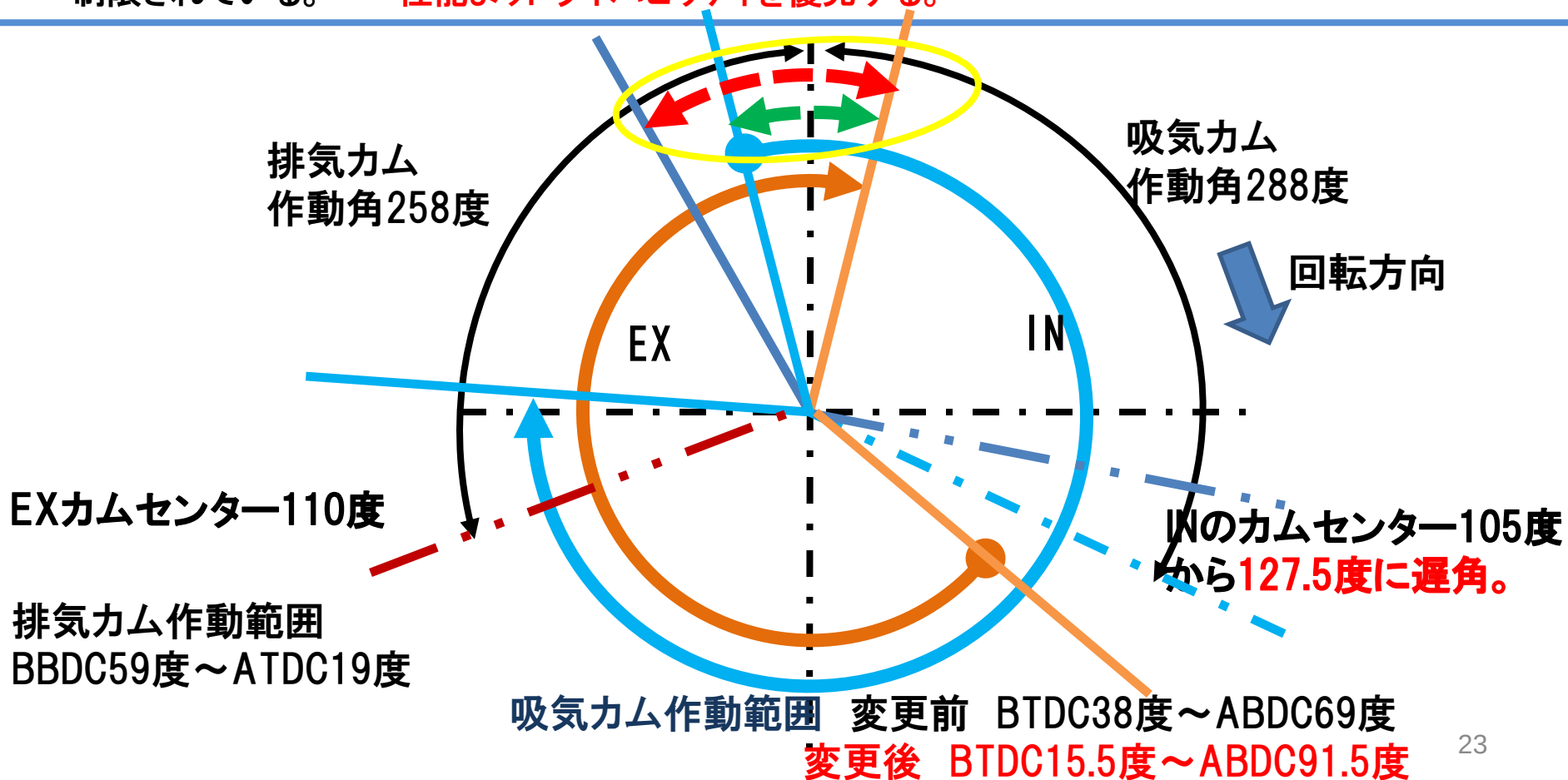
バルブリフトセンター角度 = (角度1 - 角度2) / 2 + 角度2



②学生でも出来る方法

a. IN側カムだけタイミングを遅らせる。 ZX6RRの例

- 吸気カムのタイミング カムセンターを105度から22.5度（1歯）遅角する。
- オーバーラップが58度から35.5度に縮小できる。 排気カムのカムセンター110度のままとしている。
バルブとピストンは離れる方向で安全である。
- 強烈なアトキンソンサイクルとなり性能が落ちるが、既に径20mmのスロットル/リストラクターで大きく制限されている。 性能よりドライバビリティを優先する。

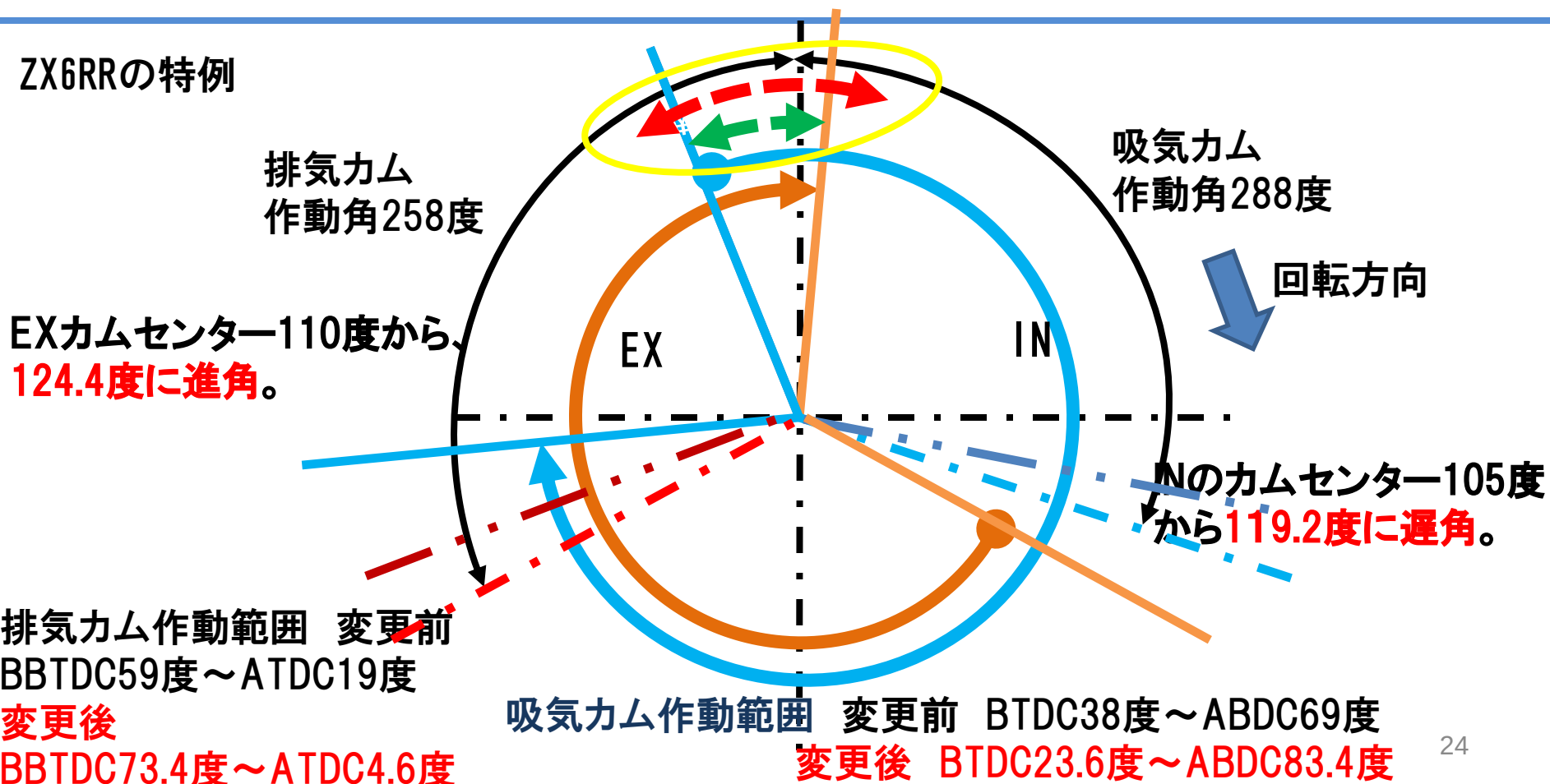


b. スプロケット取付穴を入れ替える方法 C T Mの仕様

本方法はカワサキZX6RR 4気筒に適用出来る方法で、他エンジンでの可否は分かりません

- ・ 吸気カムのタイミング カムセンターを105度から119.4度 7.2度**遅角**できる
- ・ 排気カムのタイミング カムセンターを 110度から124.4度 7.2度**進角**できる。
- ・ オーバーラップが、**58度から29. 2度**に縮小できる。
- ・ **バルブとピストンはさらに離れる方向で安全である。**

ZX6RRの特例



c. インテークカムだけ1歯遅らせをトライする場合の注意事項

インテークのカムシャフトのタイミング **変更前**

INのカムスプロケットとチェーンをずらす前にマーカをつける。



インテークのカムシャフト1歯遅らせた
変更後

組み立てた後、目的どおりになっていることを確認すること。



d. カムチェーンの浮き上がりを防ぐためにタイラップ

- 確実に組み上げるためのヒント
- チェーンリンクにつけられたマークは、スプロケットマークと合わせることで確実に組み戻すことができるが、
- ただしサイレントチェーンは圧力角を持つので作業中に浮き上がることもある。
- そこでタイラップを組み立て時だけ使って浮き上がりを防止できる。



e. カムタイミング違いでの性能比較

性能グラフ全開性能比較

FSAE仕様（1スロットルで径20mmのリストリクター付）

緑：タイミングSTDのまま＞S C T仕様

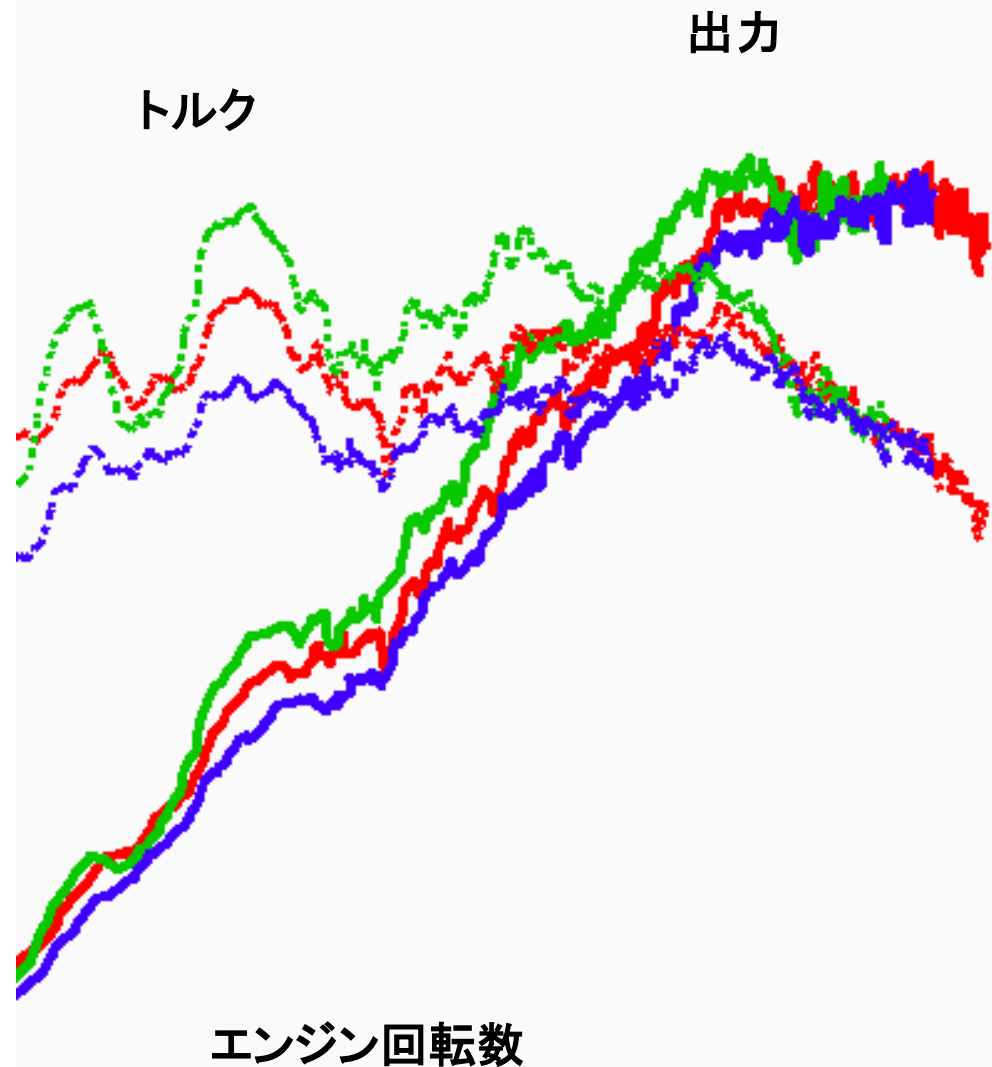
青：対策1のINのみ 11.5° 遅角

赤：対策2のIN 6° 遅角・EX 6° 進角
＞C T M仕様に近い

全域でD20mmのリストリクターの影響でどれも頭打ち。

対策1は実圧縮が下がるため中速域もパワーダウンしている。

対策2はSTDと対策1（IN側のみ遅らせた仕様）の中間の値を示す。ほぼC T M仕様



7 . 実験時の注意事項

実験する場合の注意事項を列挙する。

- ・想定しているデータにならない> 何が間違っているか疑問になれば、キャリブレーションすること。
- ・空気流量を高速で正確に取ることは難しい:市販の熱線流量計は応答遅れが大きく、定常運転時の目安にはなるが、過渡的な特性には使えなかった。
空気流量を正確にキャリブレーションするには、ラミナーフロー流量計を計画している。
自作の流量計もソニックノズル流量計でキャリブレーションすれば信頼性を確保できる。
- ・A/Fセンサーを吸気系に使うことは難しい
負圧のガスをサンプリングするため、真空ポンプが必要となった。
チャンバーの中に直接取り付けしてはならない。インジェクタ噴霧で引火恐れ有。
負圧の条件下でA/Fセンサーを使ったが、HC成分の影響もあるので、正確なキャリブレーション手法を研究、調査中。
- ・実験中のひらめきを大事にする。次に展開できるようにする。
実験を進めている内に、エンジnbrレーキ時やアイドリング時の強烈な負圧を見てみると、排ガス対策用のエアーサクションバルブ(ASV)があることに気づいた。
エキゾーストに繋がっているが、逆流してシリンダ内に酸素を追加出来るかと思った。
やってみると、アイドリング回転数がすぐに変化した。
ただしその理由を証明することは簡単ではない。

8 . 燃焼解析システムの紹介

- 燃焼圧計測・解析はエンジン内部で起きていることを把握するために非常に有効な手段です。 運転できる動力計や設備が十分ではなくても、その能力を発揮できます。 しかし燃焼圧センサーは高価。 実験手法を工夫しないと破損したり、怪しげなデータになったりもします。
- 今回のテーマ、FSAEの現実の問題を解決できるように、皆さんのアカデミック特権を活かしてシミュレーションツールの活用を進めてほしい。

WAVE、GT-Power等のツールを駆使して、この問題「学生フォーミュラの吸気系」のシミュレーションができるように精度の高いモデリングを目指そう。

燃焼解析で得られる吸気圧の波形・筒内圧波形・排気圧波形等は、シミュレーションの結果と直接比較ができ、モデリング検証のための必要なデータとなり、シミュレーションパラメータの絞込みに最も有効な手段となります。

- 近年、日本の大学等ではエンジンをテストできる動力計を持っているチームが非常に少ないことが残念である。しかし従来型の動力計は無くても合理的に過渡運転が可能なイナーシャ型のエネルギー吸収装置と燃焼解析を組み合わせれば、皆さんの開発環境を大きく改善できます。

目指せ、学生フォーミュラ・世界No1チーム