



# トラクションとトラクションコントロール

松田 義基(川崎重工業株式会社)

MotorRingの執筆依頼ということで、技術説明を開発ストーリーで語ろうと思う。学生の皆さんの何かの役に立てるなら幸いだ。

## 1. トラクションとは

‘04年モトGPセパテスト。4コーナー側道をレンタカーで走りながら競合車の走りを見ていた。新しく契約ライダーとなった中野が助手席で言う「トルクが太い、あんなトラクションじゃなかったはずだ」。トラクション、前年は散々スピに悩んでいた我々が、スピン対策というネガイメージからトラクションを造るというポジイメージに開発の舵を切った瞬間だったと思う。

トラクションを簡単に言えば、タイヤを滑らせつつも前に進める実駆動力と安心感の複合概念といったモノだ。

モトGPでは、巨額の開発費と人材、時間をラップタイム短縮に費やす。1周がおおよそ100秒前後のコースで0.1秒を短縮するために全てを注ぐ。僅か0.1/100、0.1%の違いが順位を変え、1秒も違えばポジションは10位くらい下げてしまうのに、毎年数秒単位で平均タイムが向上していった。開発競争だから、ある技術要素が有効と分かった時には他社もすぐ採用し、比較性能での優位が無くなる。そんな世界では、他より早く、速いバイクを作るために、常にチャレンジが要求される。だから開発の袋小路に入り込まないよう、真面目でとことん理詰めの技術開発が必要になる。量産車の改造レースとは全く違うリスクだ。

開発の方向性を決める感度解析の一つにラップタイムシミュレーションがある。トラクション、空力、エンジン性能を各1%改良できた際にラップタイムの向上代を各サーキット別に計算した例がFig1だ。トラクションの効果が圧倒的であることが分かる。勝つには、ピーク出力や軽量化が最優先ではない。要素としては必須だが、これをトッププライオリティとすると間違える。

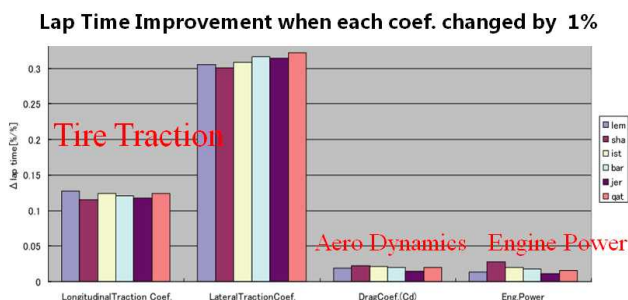


Fig.1 ラップタイムシミュレーション結果

あえて安心感を定義にいれたのには意味がある。モーター

サイクルは4輪と違いスロットルを全開にできる割合が少ない。それは急加速、急減速といった非定常状態だけの走行をタイヤは小さな接触面積で支え、車両を倒してコーナーを旋回するからだ。このためちょっとした不安心理がスロットルワークに強く影響する。ライダーはリアタイヤのグリップ状態をヒップで感じながら、タイヤの摩擦限界内ギリギリを使いきろうとする。当然、突然の外乱やエンジン特性などの内乱に生理反応で対応する。ここで車両・エンジン・電子制御の挙動がライダーにも予測し易いかどうか重要だ。安心感を敢えてコンフィデンスと固有名詞化しているのは、オートバイが走るための道具である以上、コンフィデンスが無ければ人はパフォーマンスを発揮できないからだ。顕在性能 = マシン(工学) × コンフィデンス(心理学)となる。



Fig.2 コーナー脱出; 繊細なスロットルワークが必要になる

## 2. トラクションの要素

トラクション性能を発揮するための重要要素を挙げてみる。  
扱い易いエンジン: 低速トルク絶対値、全域でスロットルにトルクが感応、ソフトなエンブレ、広い可燃限界、パワー絶対値  
曲がり易い車体: 旋回性、路面状態の把握しやすさ  
分かり易く邪魔しない制御: 環境・ライダー特性・操作ミスという外乱、エンジン特性という内乱に対するロバスト性

モーターサイクルは見た目エンジン、車体に別れていても、エンジンと車体で出来ていると考えてはいけない。本当はフロント接地感(減速旋回)と、トラクション(旋回加速)で出来ている。車体やエンジンを要素で細分化し、どの形や特性がフロント接地感やトラクションに影響するか考えてから、全体計画をする。

また、どの要素にも「易い」というコンフィデンス係数が掛っている。やはりライダーが主体であるからだ。特にトラクションコントロール(以下:トラコン)ではライダー意図の汲み取りを如何に演算ロジック化できるかが「コンフィデンス」な制御のカギになる。

### 3. 開発

#### 3.1. 黎明期

‘02年、我々のモトGP活動は突然に始まった。検討開始からワイルドカード参戦までわずか7ヶ月しかない時間不足と、20年ぶりの復帰でデータが無い状態での実戦は、混乱だった。プロジェクトに私が途中参加した同年冬でも、混沌は続いていた。

フル参戦の‘03年も具体的な課題目標を明確に設定できず不具合の対応に追われた。しばらくは最適化すべき特性や指標が掴めなかった。この状況から抜け出すためには不具合対応ではなく、成功のシナリオが必要だった。考えるために根拠とするデータ経験が無いから、実際にレースで試す。走らせて見て特性の周辺を探り、なぜその解が最適なのか探った。理屈だけでなくやってみる。これがその後ずっと我々のスタンスとなった。今考えれば、ゼロベース思考に繋がりが良かったと言えるが、当時は仕事をしつつ、同時に自己否定をする様で苦しかった。

私が新エンジンの設計リーダーになり、取り組んだエンジン特性の話から始めたい。最初の転機は、スロットルバルブだった。当初、ギロチン式のフラットバルブが採用されていたが、燃料霧化特性がまずいと考えた。そこで、通路内でバルブを回転開閉するバタフライ式に切り替え社内開発した。ピーク出力では劣るものの過渡特性が良くトラクションに有利と推測したからだ。ベンチで燃料マッピングをすませ04年ブラジルGPにぎりぎり間に合わせた。全くの試作品だったが、コントロール性に明らかな効果があり、レース投入した。熟成されていない要素がそのままレースで効果を出すことはまずない。しかし、それくらい効果が顕著だった。エンジン屋がよく議論する「動力は上か下か」ではなく、下から先に積みあげて、更にも上出せないと勝てないのだ。

次に研究をしていったのがエンジン爆発間隔特性だ。我々は直列4気筒エンジンをベースにして様々な方式を実戦で確認していった。2気筒同爆x2のBB2、2気筒同爆で他単爆x2のBB3、クランクシャフトを真ん中で90度ねじったBB4とBB4-2。当時のレース界には、このような不均等爆発のエンジントルクがトラクションに効果があるという実しやかな論理があったからだ。

工学の世界で考えれば、ピストンクランク系では50%のアンバランスがでる。このため往復運動には慣性トルクが発生し、この慣性トルクと爆発トルクの合算が出力トルクとなる。合算トルクパターンを代表的に6,000rpmと15,000rpmで示してみる。高回転になるほど邪魔な慣性トルクの影響が強く出る。90度でねじったクランクはこれを相殺するので慣性トルクは発生しない。弊社の‘60年代の技術資料にも「高回転向き」とコメントがあった。

ところが、正ライダーの代役で急遽召集された開発ライダーのオリビエがBB2エンジンで、初めての上海GPをレースし、2位を獲得している。BB2も邪魔な慣性トルクが発生するはずだ。

要点はエンジンの回転数だ。トラクションを要求するコーナー脱出ではバイクは寝ている。スロットルは全開から開けられ、エンジン速度は6,000rpm前後だ。この回転速ではBB2、BB3もBB4、BB4-2の様に慣性トルクが少なく爆発トルクがクリアだ。

また、ライダーは常に摩擦限界ぎりぎりの走行をねらうが、ひとたび限界を超えるとスピンを起こす。このスピン変化がBB2は緩やかだ。「スロットルレスポンスが悪い」ネガが、逆にライダー反応に余裕が出てコンフィデンス係数が大きくなったと言える。

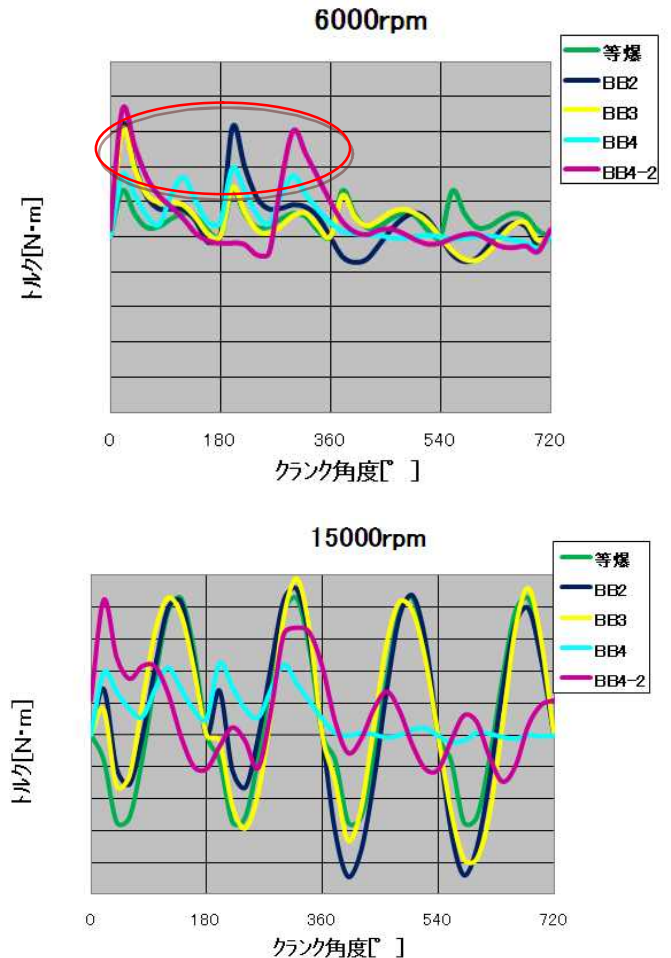


Fig.3 爆発間隔特性とエンジン速度

レース現場ではFI制御の改良開発も見えていた。この頃のトラコンは、滑りを検知してから専らエンジン特性に合わせて点火系、燃料系、RideByWireによる空気量制限によってトルクを調整するシンプルな方式とした。ただし、急激な変化だけがライダーを阻害するという発想で、単純な滑りによる判断ではなく、滑り方で対応を変えることにした。細やかなソフト改造をタイムリーに進めるため、レースウィーク中にサーキットでロジックを設計・変更し、次のレースまでにコーディングと台上チェックを伊のFIサプライヤーに委託した。このサプライヤーは、スタッフをサーキットに派遣し緊急性を共有してくれるので小集団の我々には好都合だった。もちろん、結果責任はこちらにあり、技術提案も貰えないからソフトウェアはカワサキ完全オリジナルである。

#### 3.2. 発展期

摩擦力はタイヤを車両で路面に押しつけることで発生する。車両重心やエンジン形状や軸レイアウトが重要な要素になる。剛性はさらにこの次の要素だ。‘07年からレギュレーションが変

わりエンジンが800cc化、これに合わせて車両を一新した。

既に、車両全体の開発リーダーになっていたのが車両レイアウトから考え直し、予想出力をベースに比例則で計画した(後に動力も最高速も990cc並みになり、車両を再び大型化させる。結果が伴い出し戦績も向上、上位入賞した時期だ)。

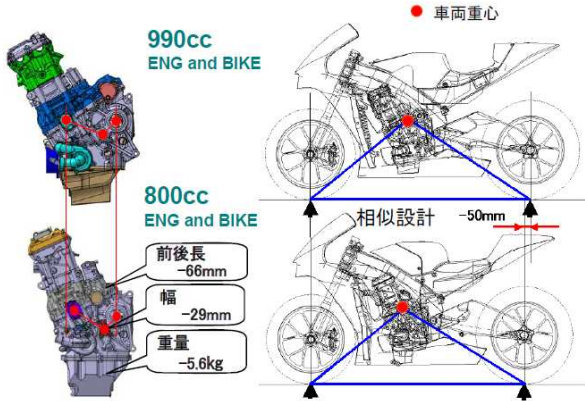


Fig. 4 990cc エンジンから 800cc エンジンへ

実際の前後駆動力の変化をモーターサイクルのリーン角を横軸に表現した(Fig. 5)。同じサーキットの比較で'06年:青に対し、'07年:赤は深いリーン角から駆動力が出せている。これは車体とタイヤで改善した摩擦限界の向上代をエンジンが滑らせずに上手く使えたともいえる。実際の車体開発現場では、ライダーコメントと剛性値だけで判断し袋小路にはまり安い。しかし現象を「見える化」するこの道具を開発したおかげで、エンジン・車体開発のベクトル合わせや改良効果確認に有効だった。

本来はおむすび型になるはずだが、三角上部がちょうどじられた形状になっている。これはエンジンパワーがタイヤ摩擦力を使い切れていないか、ウイリーが発生してしまうためだ。一方、タイヤは発熱と340km/h超の遠心力に耐えながら220馬力以上の駆動力を受け止めるハード設計であるため、摩擦力を得るためには十分な押しつけ力(垂直抗力)も必要だ。

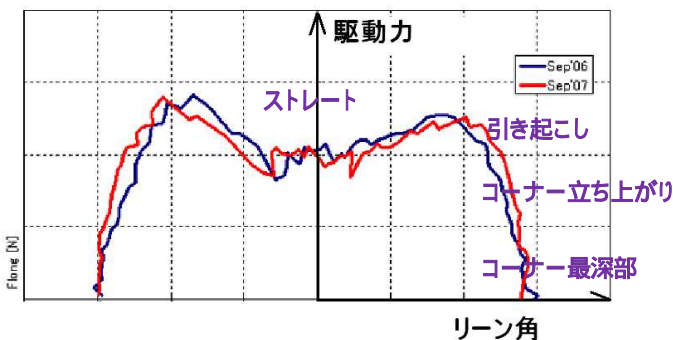


Fig. 5 実際の走行中のタイヤ摩擦力(駆動力)

押しつけ力はリーン角、リアタイヤに掛る分布荷重などで常に変り続ける。摩擦の限界を使い切るためには、車体姿勢を元に、運動方程式を計算してタイヤ特性から推定した限界吸収トルクと、ベンチ試験で得られるエンジン特性とを比較して実際の出力を決める(Fig. 6)。赤線が推定限界。この例では引き起こしによる重心の急激な上昇でウイリー限界が近づく。このため

ライダーも反応してスロットルを戻すが、戻し過ぎている。

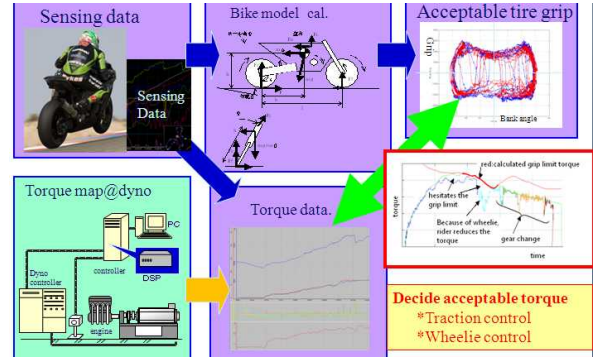


Fig. 6 限界推定システムと実際の制御結果

ライダー操作の戻し過ぎの無駄を省くため、RideByWireで自動対応した。Fig.7左側がシステム無し、右が有り。上段図青線が前輪速度で、三角に落ち込んでいるところがウイリー。右下の様にスロットルワークを減らしても制御でウイリー抑止が出来る。サーキットコースをパターン認識してコーナー毎に細かいセッティングを自動切り替えることも成功した。コーナーによってはカント(路面角度)や凸凹、特異なスリップ面があるからだ。

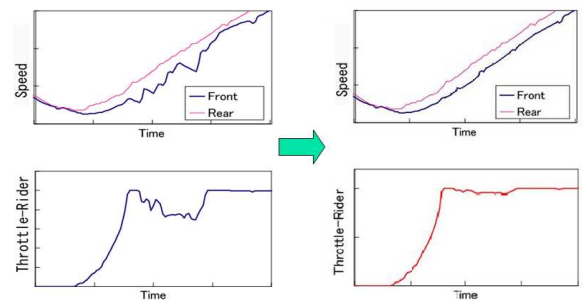


Fig. 7 RideByWireとコーナー認識によるウイリー制御の効果

### 3.3. 製品適合期

リーマンショックの影響でモトGP活動は09年3月末で休止し開発組織も解散した。そこでモトGPで培った技術を本格的に量産に適合することにし、丁度開発が進められていた1,000ccスポーツモデルのZX-10Rに、まずはトラコンを搭載しようと考えた。

しかし当時の製品には、不整地等で駆動輪が大きく滑ったら極端に出力を落とし続けるスリップ抑止制御しかなかった。弊社内でもこれをトラコンと認識する声もあり、このスリップ抑止制御をKTRC(Kawasaki TRaction Controlの略)という名称で上市していた。しかし、本来のトラコンとは、もっと動的にトラクションを

助け、造り、車両を前に進める安定化技術だ。レース場で会った欧米ジャーナリスト達の強い関心や取材からも、本物志向のニーズがすぐそこにやってくると信じて、量産採用を説得した。

ただし、量産用ECUの計算容量には制限があったし、コスト制約もあり高精度なセンサー搭載はできないので工夫が要る。そこは、車輪速、エンジン回転数、スロットル開度、ギア段数などの入力程度で車両基本特性を、曲線で代表させるアイデアを持っていた。詳しくは機密になるが、滑りの変化率を例えばスロットル開度等でまとめ近似曲線を作ると、摩擦限界とエンジン動力とのバランスが現れる。滑り変化率は物理では角速度の微分だから慣性を掛ければトルクになるからだ。これにはライディングスタイルより、車両とタイヤの特性が強くなる良さもあった。

またリーン角度センサーも廃止出来た。既存のセンシング入力で行走の場合分けを実施することで補正が適切にできたからだ。例えば、リーン角度が深いところでは全開走行はもともと出来ないし、直立でスロットルを微開にしても滑らないので状態を見ていれば、リーン中かどうかは切り分けが出来る理屈だ。

一方で、リーン角センサーは路面の角度を完璧には拾えない。例えばオーバルコースの様に路面に角度があると十分にグリップしていても重力方向の違いでリーン中と判断してトラコンが作動してしまう。またセンサーにはノイズがありこれを抑えるとしても一次遅れが発生して切り返しなどでタイミングがずれる。これらを補うような高価なセンサーは量産向きではない。

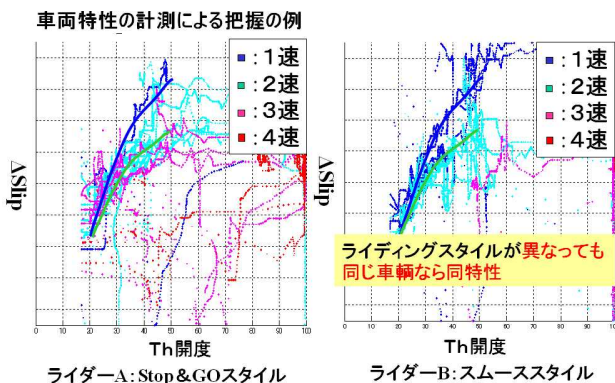


Fig. 8: 車両の特性把握の例

実際の現場開発では技術要因とセッティング要因を混同しないことが大切だ。セッティング要因を先に固めてしまうと事あるごとに手戻りやロスコストが発生する。経験豊かなメカニックが持つ複雑なセッティング術も、最適化要因で分析できる。この見極めにレース経験が活きた。またHardwareInTheLoopSimulation: HILSの開発も行い、ソフトの開発サイクル短縮、走行データの再現やセッティング効果向上にこの道具は効果的だった。

一方でライダー意図を尊重する。これを怠るとライダーとシステムは葛藤を起こす。同じ滑りでも滑りの変化や、スロットルワークを観察することでライダーにとって望ましくないスリップであるかを判断に加えた。コンフィデンス係数、黎明期のアイデアだ。

判断式 = ①ライダーの意思 + ②バイク特性  
+ ③路面推定 + ④結果からの補正

‘10年冬、協力いただいた方々のおかげもあって開発は成功し無事に量産が立ち上がった。市場や雑誌試乗評価も高く「本物のトラコン」と評された。センサー類も元々ABSで使っている車速センサーをそのまま流用、ロジックも小型化したためFI-ECUに押し込んだ。切り替えスイッチ以外はほとんどコストを掛けなかった。

現在では、他社からもトラコン搭載のモデルが次々と発表され謂わばトラコンブームとなっている。だが、今だに我々のシステムは一步先んじていると自負しており、さらにNewモデル2機種にトラコンを搭載した。スリップ抑止制御の旧KTRC機能も、この新制御で包含できたため、改めてシステムをKTRCと呼ぶことにした。



Fig. 9: ZX-10R

#### 4. おわりに

最適化は、各種応用技術を集結していく開発なので、単一技術領域の専門家では手に負えない。全体像を理解した上でさらに各領域の専門家と調整ができる総合専門家が必要になる。誰でも定性には語れ、いろいろ要因は挙げられる。ただ、どれくらい重要なものが定量的な確信がなければ、結局混乱し決まらない。「決断力」とは何か、突き詰めて考えると不要な情報を捨てるための信念だ。この軽重判断力の差が結果の差となる。

少人数組織では一人の守備範囲が広い、だから本質を早く見抜くことを学ぶ。でも、成果が見えない時は人間の弱さも出安く、壁に当たると直ぐに引き返したくなる。弱さを正当化する声も出てくる「まず足元を固めよう、現実的にもっとやることがある」と。組織の成果を顕在性能に例えれば、人の弱さもコンフィデンス係数としてマネジメントしないとブレークスルーは生れない。

モーターサイクルがライダーの速く走るための道具なら、工学も道具である。キチンと使ってやれば武器になる。未知の暗闇を恐れたり、神秘化してしまわない「科学のマインド」に、コンフィデンス「人の心理」を勘案することで、新しい道が見えてくる。

若いみなさんには、精一杯考え、意味のある失敗をして、それでも旗を掲げつづける勇気をもってほしい。大きな健康のためには、時に小さな怪我は必要だ。

最後に、モーターサイクルは面白い。

#### 参考文献

- (1) 松田 義基 : Kawasaki Technical Review MotoGP-2006 , 2006-10-30 , Valencia Spain / 松田 義基 : Kawasaki Technical Review MotoGP-2007 , 2007-11-5 , Valencia Spain
- (2) 増田 松田 : Stability Control of Motorcycle, SAE 2011-32-0558 / JSAE 20119558, SETC2011