

ソーラーカーレース鈴鹿用 テレメトリシステムの開発

Development of Telemetry System for Solar Car Race SUZUKA

須藤康裕*・藤澤 徹**

1. はじめに

競技会に参加することの意義は、良い成績を収めることによって自己の実力を他に知らしめたり、それが叶わない場合であったとしても他と比較することで自らの弱点や改善点を見出したりすることにある。あるいは自身の持つ記録を塗り替えることに執念を燃やすといった、もはや哲学的な崇高さに感心させられることもあれば、極端な例では参加すること自体に意義があるという人もいるかもしれない。いずれにせよ、エンタラントは何らかの目的を持って競技会に挑んでいるわけである。

指定された時間通りに走ったり、見た目や走り方の美しさを競ったりするなどの例外はあるが、モータースポーツの競技会においては多くの場合走行タイムや周回数を競うこととなる。すなわち競技会において最高の順位を目標とするなら、速く走るこそが最大の目的となり、ソーラーカーレース鈴鹿の目的は周回数の最大化となるわけである (Fig. 1)。

ソーラーカーレースの性質上、利用可能なエネルギー源には限りがあり、これを残さず使い切るという大前提があるわけであるが、WSC や WSR と異



Fig. 1 Solar Car Race SUZUKA.
図1 ソーラーカーレース鈴鹿

なり周回数を高めるためにはシビアなタイヤマネジメントと、他車とのレコードラインの奪い合いを制する必要がある。そのため、「周回数の最大化」という目的関数は、恐ろしい数の別個の関数が複雑に絡み合い、それぞれが非情なほどにトレードオフを形成している。ものすごく分かりやすい例はコーナーへの進入速度とタイヤの磨耗などであるが、回生ブレーキの利かせ方とステアリングの切り角のような、配慮が必要かどうか実感すらできないようなことまで全て考えつくさなければ大域的な最適解は得られない。また確定的な要素だけでなく、情報が部分的にしか得られず不完全であったり、他車のトラブルに巻き込まれたりなどといった確率的な事象も少なくない。

以上のような背景から、数理モデル化と計算機によるエネルギーマネジメントの自動化はなかなか実現が難しいというのが現状であろう。ただし今後は取得した多くのデータをCNNに学習させペース配分を出力しドライバーに指示するようなことを考えてくるチームも現われるかもしれない。筆者自身はエアコンもパワーウインドウ（この単語すら聞かなくなった）も無いような車を愛用しているので、何でもかんでも自動化することで機械の値段を高くし儲けるという現代の風潮は好きではないのであるが、

レース中はコックピットのドライバーに最も多くの情報がインプットされるのであるが、やる事がたくさんあるので全てを自分で考えるというやり方はなかなかうまく行かないことと思われる。もちろん、そこを含めて優秀なドライバーを育てることも

* 神奈川工科大学 情報学部准教授

† e-mail : sudo@ic.kanagawa-it.ac.jp

〒 243-0292 厚木市下荻野 1030

** 神奈川工科大学 創造工学部准教授

チームにとっては大事なことではあるが、殊更学生チームにおいてはメンバーの入れ替わり間隔の問題も頭を悩ませるのである。前置きが長くなってしまったが、本チームのテレメトリシステムは、競技会本戦において車両の情報をピットからリアルタイムで知ることで、ドライバーへの的確な指示を最小限のタイムラグで与えることを目的に設計している。

通信機器を含めたテレメトリシステムの重量もさることながら、シャント抵抗で生じるエネルギーロスなどを嫌って本戦は全ての計測系をキャンセルするというチームも話しには聞かぬが、これは車両の性能と特性を完璧に把握した上であらゆることに即応できる優れたドライバーを擁していればこそその芸当であると言わざるを得ない。とくに2018年の本チームは新車製作をレースに間に合わせるのが精一杯で、車両の（ドライバーも）ポテンシャルは本戦で真剣に走行するまでは未知のままというパルプンテ状態であった。何が言いたいのかということ、本チームのレベルではレース中に誰かがどこかでしっかり監視していないとうまく走らせるのが難しいということである。発電量が低下したり、走行抵抗が増加したりが確認できれば故障診断に使えるし、ドライバー自身が気付かないようなバイタルの変化を早めに察知できれば、ピットインのタイミングを考慮することもできる。また、走行後に何周目のどこのコーナーでどうのこうのと言われても、なかなか反省点を次に生かすことは難しいであろう。そういう意味では、リアルタイムに得られる情報を基に修正点をコックピットへ伝えることは、まさにレーシングドライバーのOJTである。

ここまで、本チームにとってテレメトリシステムは無くしてはならない仕組みのように記述したが、最悪無くとも車は走るというのもまた真実である。バッテリーやモータと違って優先順位が低いことから、後回しにされてしまいがち（人員、資金、etc.）であり、2018年もテレメトリシステムは筆者が開発担当になっていたが、試走会以降は手を加える時間が取れなかった。しかも試走会では電装系トラブルの原因が現場で見つけれず、疑わしい配線を全てキャンセルして出走したため予選走行で初めて実車への搭載となったわけである。幸い(?)ここ数年はメンバーに情報系の学生がほとんど居らず、1世代前の車両“KAIT Spirit”に搭載してきたシステムも筆者が担当しており、その基本設計を引き継いだため完成度は年々上がってきている。本稿ではそ

の設計コンセプトと、取得したデータを用いた解析の一部を紹介する。

2. システムの全体構成

テレメトリシステムによるデータ取得のおおまかな概念は Fig. 2 に示すとおりである。センサ類を接続したメインボードに搭載の Arduino マイコンによって、集約した情報を Bluetooth を用いて携帯端末 A に送信する。携帯端末 A は受け取った情報に加え GPS からの情報を 4G 回線を介してクラウドサーバに送信するとともに、内部ストレージに蓄積する。クラウドサーバにキャッシュされた情報は順次上書きするため、即座に携帯端末 B によってダウンロードし画面に表示する。このとき携帯端末 A によって情報が上書きされるまではサーバに留まるため、複数端末から同時にモニタリングすることが可能である。送信側・受信側ともに Android 端末である Google Nexus を用い、アプリケーション開発には MIT AppInventor2 を利用した。この開発環境は MIT が提供する、ブロックを組み合わせて Android 用アプリケーションを作るビジュアルプログラミング言語である。Gmail のアカウントがあれば誰でも無料で利用可能であり、端末に搭載のセンサ類との相性も非常に良い上にコンパイルが通ったアプリケーションの動作が極めて安定しているという特徴がある。

送信側の携帯端末は、車両とは電氣的に絶縁されており、単なる通信機器という解釈で問題なければ内蔵バッテリーがそのまま動力源である。LG エレクトロニクスの Nexus 5 を用いているが、大淵村など電波状態の良くない環境でも 5 時間くらい継続使用可能である。2018 年は、本戦でも電圧計電流計

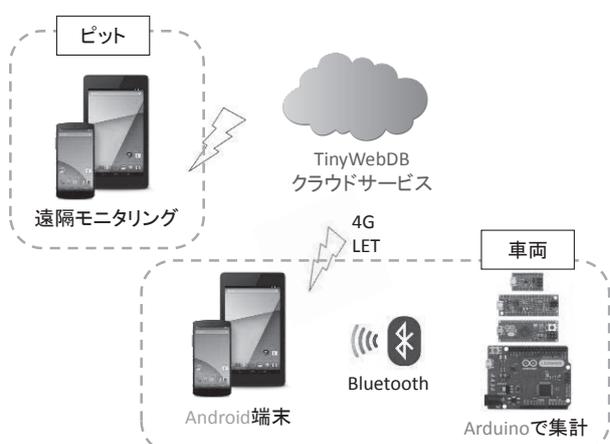


Fig. 2 System components with mobile device.
図2 携帯端末を利用したテレメトリシステムの基本構成

がコックピットに無かったため急遽ドライバーズインジケータとして液晶のバックライトを点灯し続けたが、2時間以上十分に継続使用できた。本チームでは念のためドライバー交代のときに送信側の端末を交換することになっている。即座にBluetoothのペアリングを解除し、新しい端末と交換するまでに要する時間は熟練すれば10秒程度である。なお、通信事業者と長期契約を結ぶと費用負担が大きい。2018年はIIJmioのプリペイドSIM (docomo) を購入して用いた。もちろんチーム員とか誰かの端末を流用することも可能なのが利点ではあるが、運悪く恋人から電話の着信があったりすることも考えられるので、データ通信専用SIMが良いのかもしれない。

受信側の端末にも特に制限はないが、画面が大きいと見やすいので本チームではHTC Nexus 9を導入した (Fig. 3)。こちらはピットや非遠征メンバーが遠隔地からモニタリングするための仕組みなので、Wi-Fiでも何でもインターネットにさえ接続できれば問題ない。センサ値の他、緯度経度情報を基に地図上に現在位置をプロットするための画像を中央に配置している。旧システムではGoogle MapsのAPIを利用して地図画像を表示していたが、この方式ではデータ更新の度に地図画像をダウンロードすることになるため、パケット通信量が大きくなりがちであった。新システムでは位置情報のみを取得し、静止地図上に座標変換することで現在位置を



Fig. 3 Vehicle location and information displayed on Android tablet and smartphone in the pit.
図3 ピット内にてタブレット (Android) 端末に表示した車両情報と現在位置

表示した。そのためパケットサイズは送信側・受信側共に1時間当たり数十MB程度に圧縮できており、通信状態が良好でなくとも軽快にデータを取得できる。また個人の端末やSIMカードを活用する上で、通信量の心配が少なく済むメリットは非常に大きい。ただし、観測対象が地図の範囲より外側に出てしまった場合にはそれ以上追従できないので、秋田大会のように広大なサーキットでは地図の切り替え機能をつけることで詳細な位置の把握を可能としている。

さて、このクラウドサービスを介した情報の受け渡しであるが、可能であれば独自に専用のサーバを構築し蓄積したデータにPCからアクセス・ダウンロードできるようになっていると嬉しい。Google App Engine¹⁾ を利用すれば物理サーバを用意する必要もないし、Java・Python・PHPなどでアプリケーションの開発が可能である。

しかしながらリアルタイムモニタリングというコンセプト上、1~2秒毎にサーバへのアクセスが生じるため、不正を疑われてデータのアップロードが停止してしまう問題があった。念のためより高額な契約プランに変更してみたりもしたが、毎分1回程度までしか許容されないことがわかった。これではピット前を通過するときに直接通信でデータ転送するのとそう変わらない鮮度である。そこでデータの

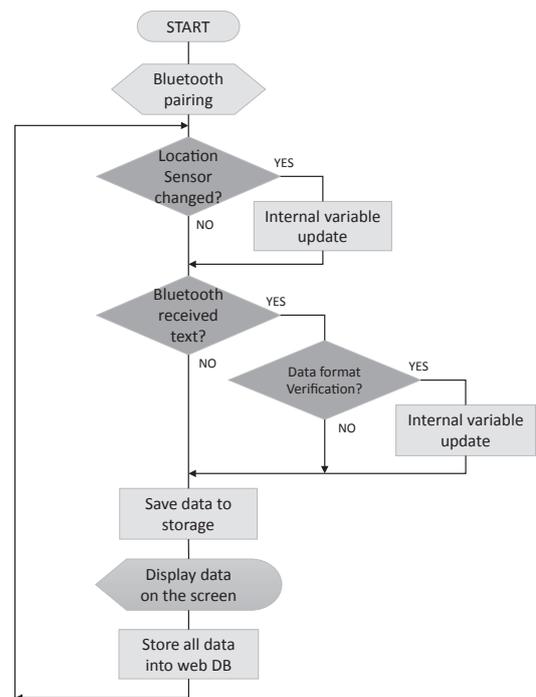


Fig. 4 Flowchart of data transmission application of in-vehicle terminal.
図4 車載端末用データ送信アプリのフローチャート

蓄積を断念し、逐次新しいデータを取り出していく運用でアプリケーションを構築した。使用したサーバはテスト用に誰でも自由に使えるサービス²⁾であるが、データが長時間残っている保障がなくデータのサイズにも制限がある。いつまでも利用可能かどうかかわからないが、本チームのシステムはリアルタイム性を重視しこのような設計となっている (Fig. 4)。

3. センサ部の回路設計

2017年までのメインボードは、センサ類がそれぞれ車両のいたるところに設置され、そこからカテゴリ6のLANケーブルを介してRJ45コネクタで接続していた。最終的に配線が汚らしくなりがちであったのと、新型車両は平面的に設置できるスペースが限られていたこともあって、すべてを1モジュールにまとめて欲しいという要望があった。かつてはXBeeを使って無線化したこともあったが、それぞれに動作電源を用意する必要があるためFIAオリムピアクラスの車検のことを考えて有線で設計した。

これまでにも電流の計測にはホール素子型のセンサを用いてきているが、配線をモジュールの中に通すか、モジュール外部にコネクタを付ける方式も検討した。かなり大径のケーブルに大電流が通ることを考え、電流センサを半分ケースの外に出す方式を採用した (Fig. 5)。

外郭はポリカーボネート製のジャンクションボックスで穴あけ加工がしやすく、完全防水の上に上蓋は透明で一応中の様子が確認できる。ノイズ防止の観点からすれば金属製のケースが望ましかったので

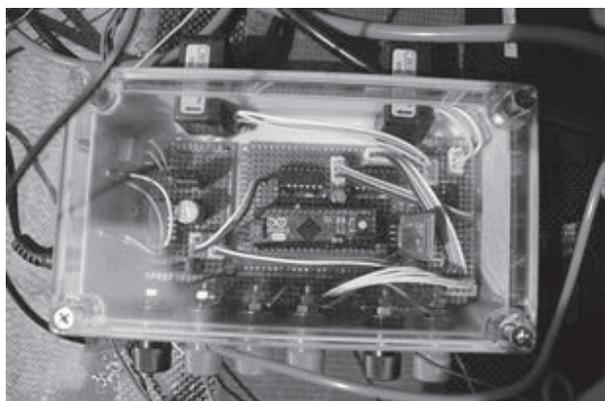


Fig. 5 A view of measuring module for the telemetry system with Hall type current sensor on a side wall.

図5 ホール素子型の電流センサを側面に取り付けたテレメトリモジュールの外観

あるが、Bluetoothで携帯電話と通信しなければならないこと、秘密のバッテリー等が内蔵されていないことが分解せずに見えることを考慮した。結果的には、インバータの真横に設置したにもかかわらずノイズの影響は見受けられなかった。その他バッテリー電圧や車軸の回転数などの電圧入力は、反対側の側面に配置した陸軍式ターミナルを介して行う。やや大きめで内部に余裕があるのは、モバイルバッテリー等を入れて使うこともできるように配慮した結果である。

前述の通り試走会での動作確認が出来なかったため、改めて専用基板を製作するまでには至らなかった。ユニバーサル基板を電源部、マイコン部、オペアンプ部、分圧回路部に分割して実装した。回路図をFig. 6に、主な使用部品リストをTable 1に示す。動作電源は車両の12V系から取り出し、基準電圧をマイコンの5Vとは別にレギュレータで生成し使

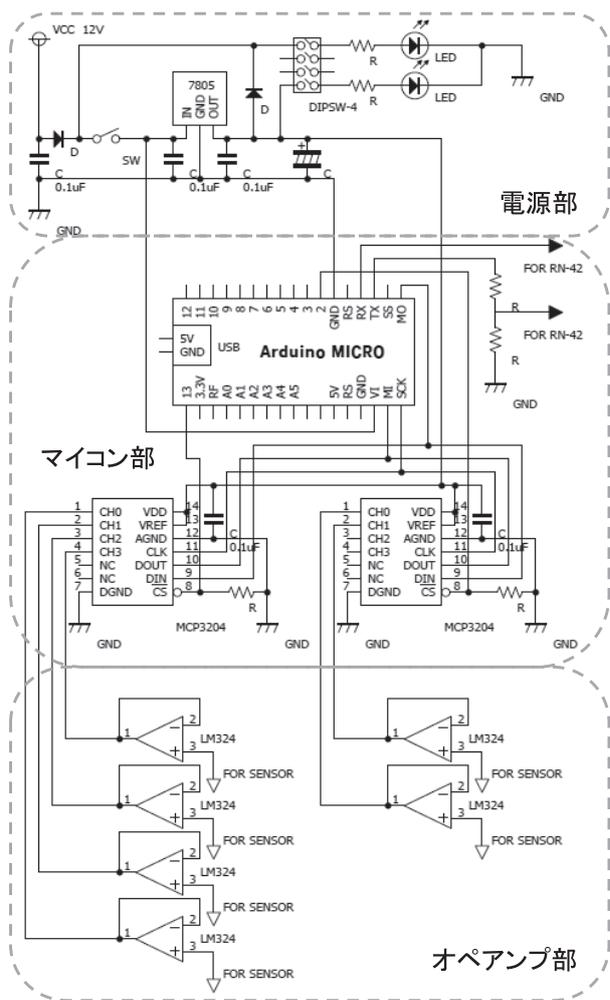


Fig. 6 Schematic of acquisition for sensor information and serial-sending to the Android device.

図6 センサ情報を集約しBluetoothでシリアル送信するための回路図

Table 1 Major components to make the system
表1 使用した主要部品

部品名	価格
Arduino Micro 16 MHz ×1	3,000 円
タムラ L01Z50S05 ×2 (L01Z100S05 が手に入れやすい)	3,000 円
MCP3204 12bit AD コンバータ ×2 (MCP3208 なら 8 入力)	400 円
RN-42 Bluetooth モジュール ×1 (HC-05, HC-06 でも代替可能)	2,000 円
5V1A NJM7805FA ×1 (より低損失な製品を推奨)	50 円
4 回路 LM324N ×2 (1 倍増幅禁止の製品に注意)	30 円
Nexus 5 Google LG (セキュリティアップデート終了)	40,000 円

用した。

Arduino Micro には 10 bit の A/D コンバータが 12 本もあるが、12 bit の MCP3204 を 2 個使用して SPI 通信で制御した。MCP3208 を用いれば 1 個で間に合ったが、故障時のリスク分散を考えるとこのような構成とした。電流センサ L01Z50S05 は ± 50 A まで測定することが出来るため、回生が掛けられた際にもそのままデータを取得できる。ただし入手が困難になりつつあるので 100 A 規格のセンサの方が準備しやすいと思われる。分圧用抵抗は日本製の 1/2 W 金属皮膜抵抗 ± 1 % を十数本の中から選別して誤差の低減を狙った。取得したデータは移動平均を取って RN-42 Bluetooth モジュールへ送り、ペアリングされた携帯端末へ送信される。

4. 取得したデータの活用事例

Fig. 7 は、テレメトリのログから散布図にプロットした経度と緯度との軌跡である。AppInventor2 の Location Sensor を使えば得られるスマートフォン内蔵の GPS アンテナからの位置情報をそのまま使用している。同図より明らかなように、ピットイン時と思われるばらつきを除けば、10 年位前にレーステクノロジー製 DL2 で計測した際に劣ることなく正確に位置情報が取得できているように見受けられる。

Fig. 8 は、あるコーナー通過時のライン取りと時速、モータへの電流である。2 人のドライバーの走行ラインと投入電流が大きく異なっていることがよくわかる。GPS の感度によって数 m オーダーでの誤差が見られることがあるが、これは携帯端末の設置場所によってさらに改善可能である（前述の通り

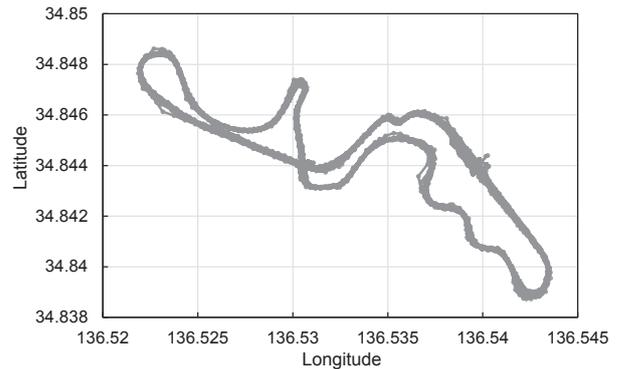


Fig. 7 Plots of GPS Data in SUZUKA 2018
図7 鈴鹿 2018 の GPS データのプロット

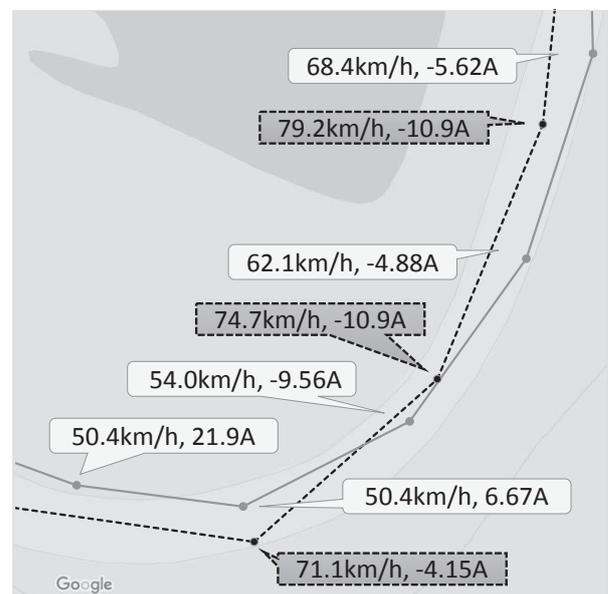


Fig. 8 Difference from the drivers' behavior (driving line, motor current and throttle information).
図8 ドライバーの違いによる走行ラインとモータ電流（アクセル開度）の比較

ドライバーズインジケータとして使用したため、コックピット奥の暗い場所に装着した)。他の車両によって走行ペースが変わったりするのでどちらが優れた走り方であるかは一概には言えないのであるが、走り方の改善点模索やリアルタイムなアドバイスを十分に役立てることができそうである。

5. デグナーカーブでのスピンとクラッシュ

ソーラーカーレース鈴鹿に数年のブランクを空けて出場したことや準備不足、設計性能の過信等で、オーバーペースのレース展開となった。いい走りをしてきていた部分もある中で、残り 1 時間を切った頃に生じた、デグナーカーブでのスピンとクラッシュについて考察してみたい。Fig. 9 はデグナーカーブ走行時のモータ電流と車速の計測データである。計

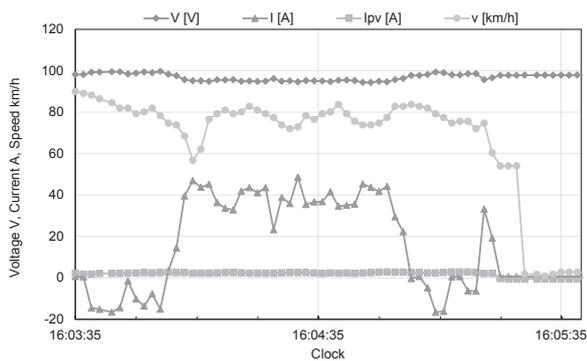
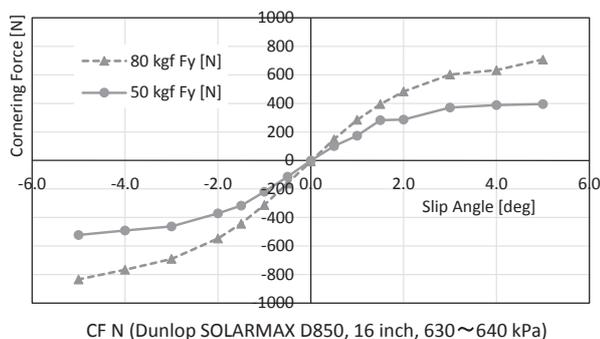


Fig. 9 Spinning stop (rear-left, single-wheel drive)
 図9 スピンによる停止 (左後輪の1輪駆動)

測間隔は2 sである。時速72 km/h以上でアクセルを開けながらデグナーを抜けようとして、54 km/hでスピン挙動に入ったことが窺い知れる。前の周では走りの上手い先行車のドライビングに追従して走行したせいか、63 km/hで抜けながら全開で加速してクリアしていたことも分かった (データは割愛する)。

次に、遠心力とタイヤのコーナリングフォース³⁾について考察してみる。Fig. 10に示す16インチDunlop SOLARMAX D850の試験結果 (50 kgf)を見る限り、スリップ角1~2度に対してコーナリングフォースは1輪当たり約300~400 N弱である。スピンする際のライン取りを仮に半径62 mと仮定すれば、遠心力と釣り合うタイヤ1輪あたりのコーナリングフォースは330 N程度となった。

このような状況でデグナーカーブを走行した場合に、クリーンに走れていれば、タイヤを横滑りさせてしまいながら、どうにか曲がり切れるような気もする。しかしながら、問題はこれにインホイールモータの駆動力がヨーモーメントとして加わることである。前後力と横力を同時に出不せないというタイヤ摩



CF N (Dunlop SOLARMAX D850, 16 inch, 630~640 kPa)

Fig. 10 Cornering force vs. slip angle of 16 inch Solar-car-grade racing tire

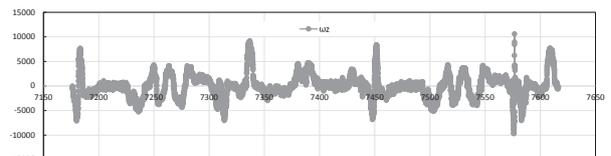
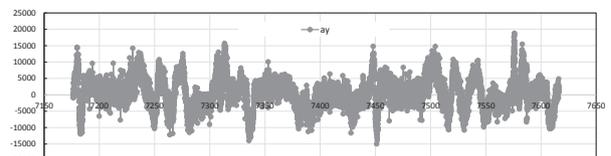
図10 ソーラーカーレース専用16インチタイヤのスリップ角に対するコーナリングフォース

擦円の性質上、駆動力のない前輪が横力を出し続けていて左後輪が横力を失うことも作用して、直ちにスピン挙動に入ってもおかしくないことが考えられる。文献⁴⁾と比較して輪荷重が低下することでコーナリングフォースの飽和値が低くなっている。

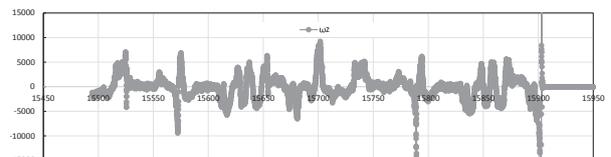
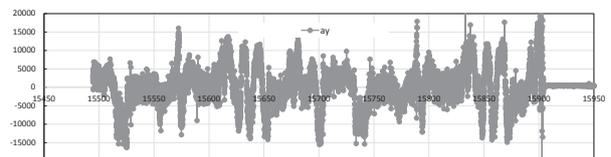
レースや車両運動性能・操縦安定性に関しては本チームの現状では検討不十分であり、分からないことだらけである。オーバースピードでコーナーに進入したか、ステアリング操作やライン取りに無理があったか、アクセル操作に無理があったか、左後輪1輪駆動によるヨーモーメントが過剰であったか、というところがすぐに思い当たる。さらにその他の可能性として、タイヤが熱ダレまたは消耗してグリップを失いやすくなっていたか、サスペンションのストローク等の問題でタイヤの接地荷重のバランスが崩れていたか、ステアリングの設計の問題など、仮説はいくらでも挙げられるだろう。

テレメトリとは別に、自動車部出身の迎君が卒業研究用に搭載したマイコンの計測データも紹介する。Fig. 11はGenuino101に内蔵のIMU (慣性計測ユニット)を用いた2018年の計測データの一例である。

計測値の誤りでなければ、およそ30~50 msご



(a) 1st driver



(b) 3rd driver

Fig. 11 Comparison of lateral acceleration and yaw angular velocity

図11 横加速度とヨーレイトの比較

とに $\pm 2G$, $\pm 125 \text{ deg/s}$ のデータが $\pm 15 \text{ bit}$ で得られているはずである。第1ドライバー(迂拙)のデグナーカーブでは左方向への1G未満の横加速度とともに、シケインと同程度の大きさで時計回りのヨーレイト 27 deg/s 付近が記録されている。第3ドライバー(3年生)の横加速度はコーナリングスピードを上げていて、1Gを超えているだけでなく、ヨーレイトはシケインで 38 deg/s に近づきロールレイトも出ており、片輪が浮いた可能性が高い。最後にデグナーでスピンした際は左方向への1.2G程度の横加速度、 125 deg/s の計測レンジを振り切る時計回りのヨーレイトを記録していた。大会競技中の実況解説者の表現とも合致する“イン巻き⁵⁾”でスピンしながら、立体交差点付近のイン側のガードレールに向かってコースアウトしていったことが分かった(幸い、カーボンモノコックの車体に守られたドライバーは無事であった)。

鈴鹿初体験のドライバー3人(学生2人, 教員1人)で臨んだソーラーカーレース鈴鹿5時間耐久レースでは、完走できず秋田への転戦も叶わなかった代わりに、今後に活かせるデータが残された。長年のテーマである「少ないエネルギーで速く」, に加えて、操縦安定性も課題である。設計・製作に目が行きがちだが、レース準備と教育研究(+生活)をしっかりできている常連チームは強いと感じている。

6. おわりに

ソーラーカーレース鈴鹿用に開発し、改良を進めてきたテレメトリシステムの概要と計測データについて紹介した。Arduino, センサ, XBee, Bluetooth, 4G回線+クラウド, スマホ送信・受信・表示プログラムの恩恵を活かしてIoTが実現できている。大会ではオーバーペースで完走ならず、思うような成績を収めることができなかったが、それだけソーラーカーレース鈴鹿のレベルが上がっている証拠だと考えることもできる。先日ある人に伺ったところ、「トラブルはご褒美」だという。次に向けて繰り返さないように「宝」として活かしたらよいと教えられた。今後のモチベーションと励みとしたい。

今後の課題として、高精度GPSでの車両位置情報の計測⁶⁾やコーナリングドラッグ, タイヤ消費エネルギーに関する検討がある。極小トレッドのレーシングソーラーカーにおける駆動力配分(トルクベクタリング)や横加速度の増分に連係した前後加速度の制御を搭載して、経験の浅いドライバーで

も操縦安定性が高められるようにしていきたい。

7. 謝辞

ソーラーカーの開発や研究を行うに際し、ご理解・ご協力を戴いた学内外の関係者の皆様方に、この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Google App Engine (Feb. 2019), <https://cloud.google.com/appengine/>
- 2) App Inventor for Android: Tiny WebDB Service (Feb. 2019), <http://appinvtinywebdb.appspot.com/>
- 3) 自動車工学編集委員会, 自動車工学 [第2版], 140 (2011), 東京電機大学出版局, 東京.
- 4) 須藤隆, 村上雅亮, 田村俊介, OSU model S'の進化とエネルギー・マネージメントについて, 電気自動車・燃料電池車・ソーラーカー製作講習会テキスト, Japan Solar Energy Society (2011), 75, 芦屋.
- 5) ソーラーカーレース鈴鹿2018 | FRESH LIVE (フレッシュライブ) (Feb. 2019), https://freshlive.tv/solarcarrace_suzuka
- 6) 佐川耕平, 木村英樹, 福田紘太, ソーラーカーの電気システムの考え方, 電気自動車・燃料電池車・ソーラーカー製作講習会テキスト, Japan Solar Energy Society (2018), 66-67, 高輪.

筆者紹介



須藤 康裕 (すどう やすひろ)

博士(工学), 神奈川工科大学准教授, 情報学部情報工学科。ダートトライアルのドライバー経験を活かして, 2013WSCにドライバー兼サポートスタッフとして出場, 2018鈴鹿用テレメトリシステム開発および新車製作, 第1ドライバーを担当。



藤澤 徹 (ふじさわ とおる)

博士(工学), 日本太陽エネルギー学会編集委員, 神奈川工科大学准教授, 創造工学部自動車システム開発工学科。2003電気電子工学科助手時代にKAITソーラーカープロジェクト立ち上げ時から関わる。2004鈴鹿出場時はドライバーとテレメトリ, カウルを担当。2013WSCにKAIT Spiritで初出場。