

Consideration of Energy Management and Telemetry for a Racing Solar Car using ELTRES Communications

Toru FUJISAWA^{*1‡}Takehito NAGASHIMA^{*2}Yasuhiro SUDO^{*2}Shizuya SUZUKI^{*3}

ELTRES 通信を用いた競技用ソーラーカーのための テレメトリとエネルギーマネジメント考

藤澤 徹^{*1‡}永島 岳人^{*2}須藤 康裕^{*2}鈴木 志津也^{*3}

Abstract

This paper reports on the operating result of the telemetry system for information acquisition from a running competitive solar car with ELTRES based on Low Power Wide Area Network (LPWA) in the 2023 and 2024 World Green Challenge (WGC) competitions. Energy management in the racing solar car for PV generating power and output power from Li-ion battery are discussed. Moreover, according to the regulations of competition, methodology for providing target rally clock to all members and command target cruising speed to the cockpit driver are described.

Keywords: ELTRES, LPWA communication, Telemetry, Solar car, Energy management, Education

キーワード: エルトレス, 低消費電力広域通信, テレメトリ, ソーラーカー, エネルギーマネジメント, 教育

1. はじめに

テレメトリとは人工衛星やドローンなどのカメラ・センサから遠隔計測するリモートセンシング¹⁾と異なり、遠隔地にある計測器のデータを無線通信により取得(または機器を制御)するものであり、遠隔計測器はテレメータとも呼ばれる²⁾。ソーラーカーにおいてテレメトリは走行しているドライバーと通話併用等で連携しながら走行ペースを決定する基盤として重要となるものである。国内外のソーラーカー競技では、これまでに大会ごとの特徴に応じてアマチュア無線の基地局^{3,4)}を用いるものや、産業用ラジコン無線を使用するもの⁵⁾、特定小電力シリアルデータ伝送⁶⁾、携帯電話回線^{7,8)}、XBeeや長距離Bluetooth無線⁹⁾、無線LAN通信、LPWA (Low Power Wide Area Network) 通信の一種であるLoRaWANを用いるもの¹⁰⁾などが投入され、テレメトリとして運用例がある。本稿では、Fig. 1に引用したコース(現在は北の端の手前で折り返す1周25 kmの往復路)で2023年と2024年の8月に開催されたWGCソーラーカー・ラリー¹¹⁾に出場したKAIT Solar Car Projectのテレメトリについて述べる。走行中の車両の情報を遠隔にて取得するために、LPWA通信の一種であるELTRESを用いたシステムの概要とその運用結果について報告する。さらにPVによる発電電力とLiB (Li-ion battery)

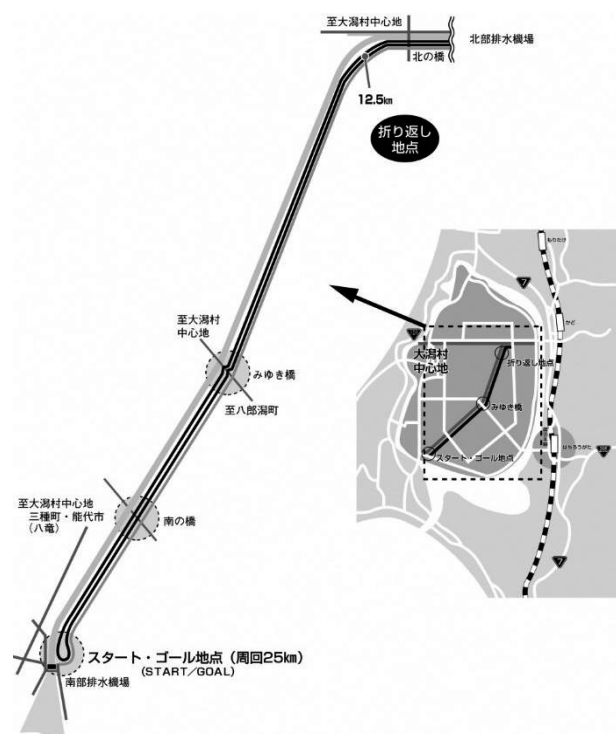


Fig. 1 Ogata village Solar Sports Line¹²⁾.

図1 大湯村ソーラースポーツライン¹²⁾

^{*1} Associate Professor, Kanagawa Institute of Technology, 1030 Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan
‡e-mail: fujisawa@cco.kanagawa-it.ac.jp

^{*2} Kanagawa Institute of Technology, Graduate School of Engineering, Course of Information and Computer Sciences

^{*3} Furukawa Battery Co., Ltd., 2-4-1 Hoshikawa, Yokohama 240-0006
Received: December 2 2024, Accepted: April 10 2025

から供給される負荷の消費電力に関するエネルギーマネジメント

^{*1} 神奈川工科大学准教授 (〒243-0292 厚木市下荻野 1030)

‡e-mail: fujisawa@cco.kanagawa-it.ac.jp

^{*2} 神奈川工科大学大学院 情報工学専攻

^{*3} 古河電池 (〒240-0006 横浜市保土ヶ谷区星川 2-4-1)

(原稿受付: 2024 年 12 月 2 日, 受理日: 2025 年 4 月 10 日)

ント(以下, エネマネ)およびレース中のペース管理(以下, レース管理)に関して競技規則も含めた考察を試みる。

2. テレメトリシステムの概要¹³⁻¹⁴⁾

本研究で用いたテレメトリシステムについて概説する。ソーラーカーに搭載する上で小型軽量かつ低コスト・低消費電力の長距離無線計測を実現すべくIoT用途として広域低消費電力のLPWAを採用した(後述のELTRES¹⁵⁾通信方式)。本学では当初からデジタル方式として2004～2011年までPHS内蔵データロガー(NEC三栄MT-1200ワイヤレスセンシングモニタ¹⁶⁾)を鈴鹿サーキットで運用し, 第2世代は2012年に山田らが製作したArduinoとBluetooth/Android端末による学内専用サーバーを用いたシステム¹⁷⁾, 第3世代は2013年の豪州大会用に上記をWi-Fiに置換し追走車と直接通信する構成, 以降もArduinoとBluetooth/Android端末を用いた構成であるが, 2015年の第4世代は須藤らがXBee¹⁸⁾による車内配線のスマート化を行い, App Inventorによる専用サーバー不要のGoogleクラウド利用へ移行した(インターネット接続さえあれば世界中からモニタリングが可能)。2017年の第5世代では上記からXBeeを廃してArduino microに計測部を集約した。また, 運転席内にドライバー用情報提供装置(ドライビングインジケータ)を設け, ビットとの通信が途絶えた場合でもドライバーがある程度自立してエネマネに挑戦できるよう工夫した¹⁹⁾。

2.1 携帯通信からLPWA通信に至る経緯

Android端末とArduinoによる従来のテレメトリは発電・消費する電力量の他にも車両の現在位置やGPS速度, 日射センサ出力値等, 現地にいない人員からの見守りはクラウドを介して行う。このために大手キャリア系のSIMを使用したが高額なデータ欠落が多発した。詳細を知るために2023年大会の2か月前にソーラースポーツラインを借りて試走しながら運転席内でスマートフォンの基準信号受信電力(RSRP)を計測してみると, 大手通信事業者でもとても弱い -120 dBm以下²⁰⁾や通信途絶を示した(Fig. 2のMNO AとB)。このように, 大潟村では大手のサービス圏内であっても実際に電波強度が低下して計測不可となるケースは多く, 格安SIMではより顕著な傾向があった。よって, LPWA通信を導入すればデータの取得を絶え間なく行えるという当時の学生の提案もあり, 教育を兼ねて改善に取り組んだ。

2.2 通信とデータのバックアップ

キャリア回線不通時に対するシステム拡張を意図して2022年に追加し使用したLoRaWANは基地局を自ら設置し直接通信するタイプのLPWAであり, 見通し距離は数kmにおよぶ。マルチホップ対応であるがフレネルゾーンを確保する意味でアンテナの設置高さや見通し距離といった広い空間が必要であることが判明した。その後の対策としてTable 1とFig. 3に示す中継局を必要としないクレスコ製ELTRESアドオンボード²¹⁾を2023年に試用し, 2024年は正式に運用した(ソニーネットワークコミュニケーションズ製Spresense拡張基板上に載せて, 920 MHz帯の外付け防水アンテナはLoRaWAN用を流用)。このようにELTRESを使用することはキャリア回線のバックアップやエネマ

ネの継続的な支援を意味する一方で, キャリア回線もELTRESも不調の場合に備えるデータ保存先も必要である。端末内に計測データを保管する機能をAndroidアプリにもたせており, 通信途絶連続時は走行後にデータ回収を試み事後検討できるようにしている。

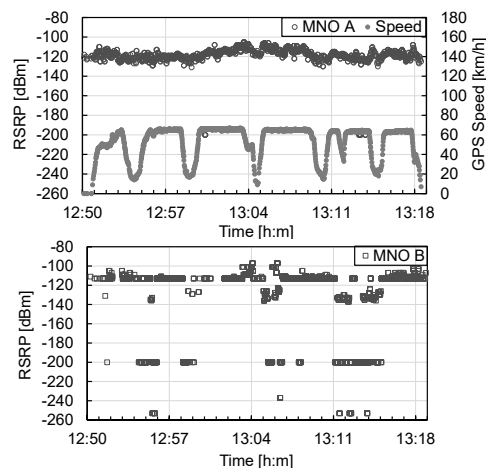


Fig.2 RSRP evaluation on trial drive at the course (2023 June).

図2 基準信号受信電力の同コース試走時評価(2023.6)

Table 1 Specifications of CXM150x ELTRES add-on.

表1 エルトレスアドオンボードCXM150xの仕様

Vendor	CRESO Ltd.
Communication freq.	923.5~928.1 MHz
Prospect distance	~100 km
Data length / interval	16 Byte / 1 minute
Supply voltage	2.0 V
Transmitter power	20 mW
Interface	UART
Extension board	Spresense extension board (Arduino compatible pins-layout)
Antenna (LPWA / GNSS)	IM920ANT-XL / ADA-2461



Fig. 3 External antenna connectors and ELTRES add-on board on the Spresense extension board.

図3 スプレッセン拡張基板上のエルトレスアドオンボードと外部アンテナコネクタ群

Fig. 4 はELTRES通信(網掛け部)を既存テレメトリシステムに追加(拡張)したフローチャートを示し, Fig. 5 左はマイコンやセンサなどの電子回路による計測部, 同下にドライビングインジケータ, 同右にELTRESを示してある(これらの車載デバイス間には有線のArduino親子通信としている)。この構成にした理由は,

大潟村ソーラースポーツライン全域をカバーしているELTRESであれば中継ポストなしでコース全域に亘る通信が見込め、Android端末不通時もテレメトリを継続出来るためである。

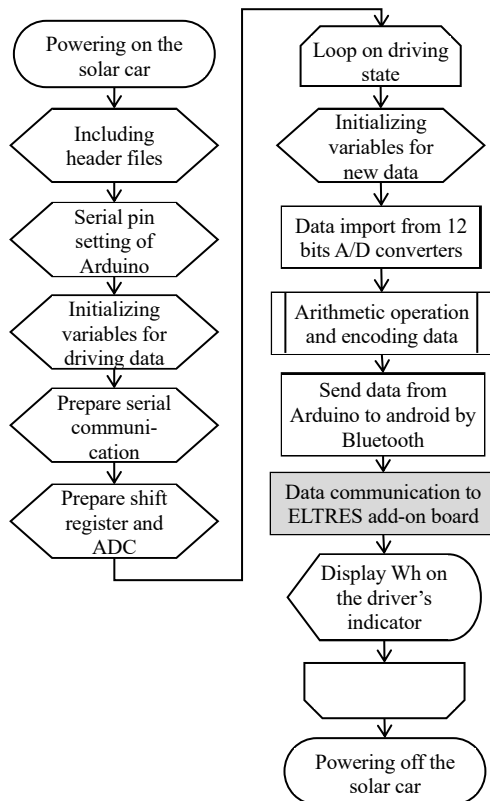


Fig. 4 Flowchart of telemetry with driving indicator and measuring part to which ELTRES communication added.

図 4 エルトレス通信を追加した計測部とドライビングインジケータを備えたテレメトリのフローチャート

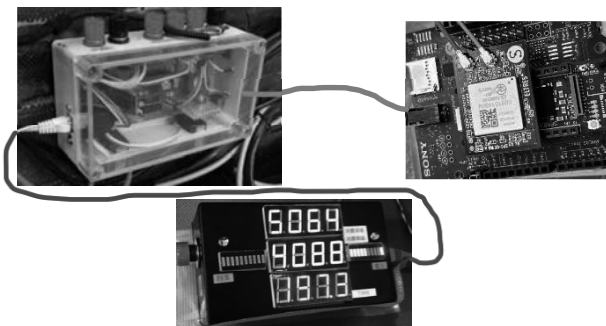
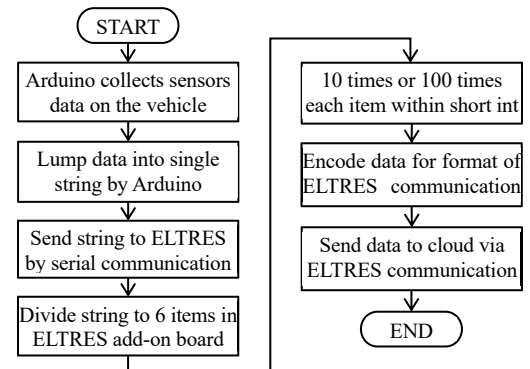


Fig. 5 Measuring part (left), indicator (low) and ELTRES (right).
図 5 エルトレス(右), インジケータ(下), 計測部(左)

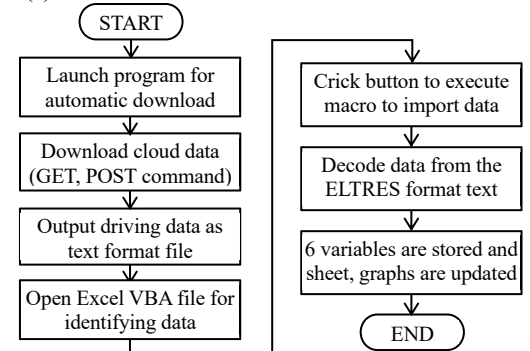
トレードオフとして、最小送信間隔1分かつ送信できるデータは16 Byte(ただし先頭2 Byteはペイロード識別番号のため、データは実質14 Byte)という制限があり、浮動小数点数のデータを小数第2位までのshort int型に整数化し2 Byteにした測定値をHEXで並べた文字列で扱う工夫を施す必要があった(Figs. 6-7). ELTRESで無線通信するデータはLiB電圧、モーター電流(インバーター入力電流)、太陽電池電流(MPPT出力電流)、累積消費電力量、瞬時消費電力、日射センサ出力値の6データとして、2023年は毎分1計測の瞬時値、2024年では1分間に

11回計測した平均値を求めてからペイロードデータを送信するものとした。これらはエネマネに直接必要な計測値であり、スマートフォン端末のキャリア回線経由では他にも車両の現在地を示す緯度・経度や車両のGPS速度等も把握できる(ELTRESとは冗長性をもたせていて、PV発電量や消費電力量も随時把握できるようにしている)。



(a) Encode and send data by ELTRES communication.

(a) ELTRES 通信によるデータ送信時のエンコード



(b) Decoding after receiving data.

(b) データ受信後のデコード

Fig. 6 Flowchart of encoding / decoding data.

図 6 エンコードとデコードのフローチャート

8a00c230cc02d9feed22112f00000000									
30c2	02cc	fed9	22ed	0000	2f11				
12482	716	65241	8941	0	12049				

Fig. 7 Decoding sample from hex data of 2 byte each.

図 7 2 バイトごとの HEX データからのデコード例

3. テレメトリの運用および計測結果

大潟村ソーラースポーツラインを往復走行する車両からスタート地点にあるピットまでELTRES通信で毎分データを転送する。ELTRESではGNSS (Global Navigation Satellite System) により人工衛星から正確な日時情報を取得したのちに通信を開始するため、カウルを被せる前にGNSS受信を確認している。優勝争いをしていた2023年WGC大会1日目の運用は4-14周回, 10:45-16:49におけるレコード数365分に対して通信成功レコード数が215分, ELTRES通信成功率は58.9%であった。公式な車両別ラップタイム²²⁾より、同時刻内の停車時も含む平均車速45.7 km/hと時間の積から簡易的に求めた通信途絶分布(5分

超続いた喪失レコード数[分])を1/4区間ごとにFig. 8に示す。

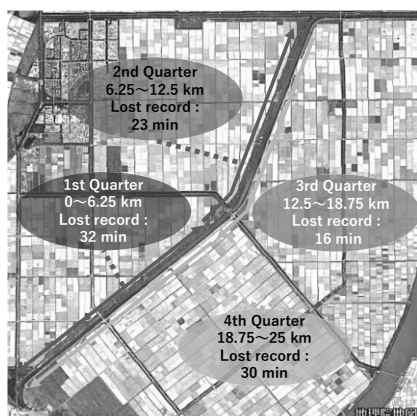


Fig. 8 Distribution of lost record (over 5 minutes continuously) for ELTRES data communication in WGC2023 Day1.
図8 2023WGC 初日のエルトレス通信途絶分布 (5分超連続)

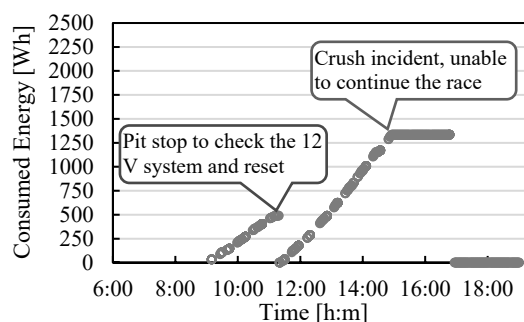


Fig. 9 Transferred data of ELTRES (WGC2024 Day1).
図9 2024WGC 初日のエルトレス転送データ



Fig. 10 Installation point of the external waterproof antenna hidden under the CFRP canopy (WGC).
図10 炭素繊維強化プラスチック製キャノピーの下に隠れた外付け防水アンテナの設置場所(WGC)

Fig. 9に示す翌2024WGC大会初日の運用では9:09-17:00の同成功率は51.4% (ただし周回時間30分以下で高速走行した9:09-14:54ではレコード数345分に対して通信成功数は120分、同成功率は34.8%)であった。15時以降は衝突事故で走行していないことからデータの伸長は止まっているが、通信は連続していた。ここで特筆すべきは、2024年はインバーター搭載位置の変更等により通信成功率は低下したが、ELTRES通信のみでテレメトリが成立した点である。同図は負荷であるモーター・インバーターの累積消費電力量であるため、通信途絶時も瞬時値の欠損を心配することではなく、次に転送が再開した時に現状が把握できる点でエネマネとレース管理の運用に耐えた。



Fig. 11 Antenna exposure at practice and test drive.
図11 練習および試験走行時のアンテナ露出

大会本番では、後方視認用電子カメラを使用するため、外付け防水L字アンテナはFig. 10に示すようにカウルとキャノピー下に隠れる空間へ設置している。Fig. 11に示す2023年6月のソーラースポーツライン試走時には同カメラ部の穴を塞ぐ形でアンテナを炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 製カウルからしっかりと露出させて走行しており、その違いによってFig. 12のように南の橋を越えてみゆき橋 (Fig. 1参照) の先までELTRESの通信に問題がなかったと考えられる。導電性のあるCFRPを通過する電波の減衰によるELTRESの通信途絶を回避するためには、キャノピー (風防) の一部を切り取って絶縁体の透明カバーにするか、カウルやフレームの一部にアンテナ機能をもたせるなどの対策を講じれば改善は可能と思われる。

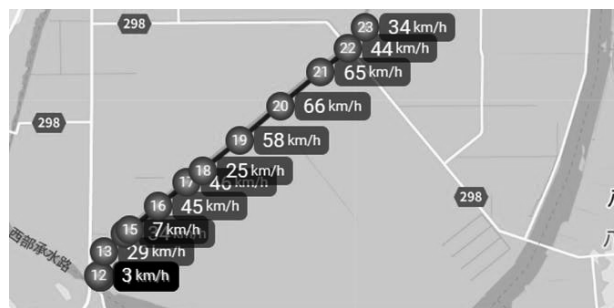


Fig. 12 Example of succeeded ELTRESS telemetry by the test run on the Solar Sports Line with Fig. 11.
図12 図11の状態ソーラースポーツライン試験走行時に成功したエルトレス通信の例

4. 問題解決型教育としてのエネマネ

消費電力と発電電力の見込みやトレンドデータからエネルギー残量と走行ペースを把握し、レースを管理する基準となるエネマネは問題解決型教育の観点で重要である。エネルギーの大雑把な把握の例としては以下のとおりである。実際に走らせてみると目論見通りにいかない事は多く、理想と現実とのギャップへの対応、データ欠損やアクシデントの発生を見越した工夫、課題と改良点等について考察する。

4.1 エネルギー概算

エネルギー収支の概算例を以下に示す。

4.1.1 LiB エネルギー

中古再利用の18650型セルを下記のような構成で競技規則

に許される10 kg以下で最大限使用する。

$$(3.3 \text{ Ah} \times 8 \text{ 並列}) \times (3.6 \text{ V} \times 26 \text{ 直列}) = 2.47 \text{ kWh} \quad (1)$$

4.1.2 PV 発電量

SunPower 製の裏面電極型 E66 Je3 単結晶 Si PV セルを競技規則に対応する 4 m^2 以内で最大限使用し、晴天日で3日間(初日競技走行開始前の9時間と最終日競技終了後の8時間を除く計55時間)を見込む。セルの面方位分布とコース脇の植栽(Fig. 13)による西日の影等も無視できないが、日没付近の競技走行時間外に許される太陽光による充電も考慮して設備利用率を13%と仮定する。

$$3.0 \text{ W} \times 258 \text{ 枚} = 774 \text{ W} \quad (2)$$

$$(155.0 \text{ cm}^2 \times 258 \text{ セル} = 3.999 \text{ m}^2) \quad (3)$$

$$774 \text{ W} \times 55 \text{ h} \times 0.13 = 5.53 \text{ kWh} \quad (4)$$



Fig. 13 Northeast turning point and trees beside the course.
図 13 コース脇の木々と北東の折り返し地点

4.1.3 合計エネルギー

上記の合計値から、エネマネのベースとなるエネルギーの見積もりが得られる。

$$2.47 + 5.53 \approx 8.0 \text{ kWh} \quad (5)$$

仮に、ソーラースポーツラインを1周走行して200 Wh の消費ならば、 $25 \text{ km} \times 40 \text{ 周} = 1,000 \text{ km}$ を走破できることになり、表彰台に近づくことを意味する。競技走行時間にロスタイムや時間規制等を考慮した安全率0.9を乗じて平均周回時間も求めておくと、単純計算では

$$25 \text{ h} \times 0.9 / 40 \text{ 周} = 0.5625 \text{ h/周} = 0:33:45 \quad (6)$$

の平均周回時間となる。連続運転時間やコース入口閉鎖などの競技規則に基づく重要時刻に注意して時間調整し、ドライバー交代の時間ロスやエネルギー収支の変化も勘案して現実的か否かを判断しながらレースを展開することになる。

4.1.4 走行抵抗

$$F = ma + \mu mg + mg \sin \theta + \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad [\text{N}] \quad (7)$$

ただし、 m :ドライバー・パラスト込み総質量 [kg]、 a :加速度 [m/s^2]、 μ :転がり抵抗係数(RRC)、 g :重力加速度 [m/s^2]、 θ :勾配 [rad]、 ρ :空気密度 [kg/m^3]、 C_D :抗力係数、 A :前方投影面積 [m^2]、 v :走行速度 [m/s]であり、簡単のために等価慣性質量、転がり抵抗の速度依存性、コーナリングドラッグ、風向・風速を無視する。

4.1.5 消費エネルギー

$$E = \int F v dt = \int (IV/\eta) dt \quad [\text{J}] \quad (8)$$

ただし、 IV :インバーター入力電流とLiB電圧の積 [W]、 η :LiBとモーター・インバーターのシステム効率である。

エネルギー収支的には負の出力電力となるPV出力とモーター回生電力は、計測された値が全て電荷として蓄えられるわけではないがPV出力はモーター・インバーターに供給されることが多く、回生ブレーキの頻度・回生量とも鈴鹿サーキット等と比べると少ない。このことから、簡易的にすべて消費削減分として積算し、システム効率を0.9と仮定して変換ロスを見積もった。

4.1.6 速度制限区間あり(運動エネルギー損失区間)

スタート地点付近 30 km/h,

橋の下通過区間 25 km/h×4 回,

折り返し地点付近 15 km/h (Fig. 13)

4.1.7 周回時間と平均速度の目標例(経験上の目安)

(a)晴天時・ノートラブル、減速区間・交代時間込み

4.1.3項の議論から、平均周回時間と平均速度はおおよそ30分 $\Rightarrow 50 \text{ km/h}$ となり、目標平均速度から目安となる加減速時間と巡航速度等があれば1,000 km達成にはよい目標値となる。

(b)曇天や雨天時、転がりが悪いとき

晴天時より変動幅は大きくなり、平均周回時間と平均速度はおおよそ43~75分 $= 35 \sim 20 \text{ km/h}$ となる。

雨風の際には空気抵抗や転がり抵抗が悪化し、視界確認やドライバー交代にも時間がかかる。競技コースの短縮や競技日程の縮減が競技委員長から告げられた場合に備えて余力を残すか否か、いずれも安全を優先して判断する必要がある。

4.2 車載計器による独立型のエネマネ

前述のとおりテレメトリには無線通信とは別に車載する計測部と表示部があり、Arduinoの親子有線通信でLEDのインジケータに表示してドライバーのエネマネをサポートしている¹⁹⁾。

Fig. 14の典型簡易フローチャートに示すように、通常のエネマネには累積消費電力量と巡航時のバッテリー電圧(または消費電流)を参考値として用いている(無線データ取得が途絶えた時は、車載計器の直読みによって独立型の運用も可能である)。よって、予め巡航時の消費電流(複数の放電レート)とバッテリー

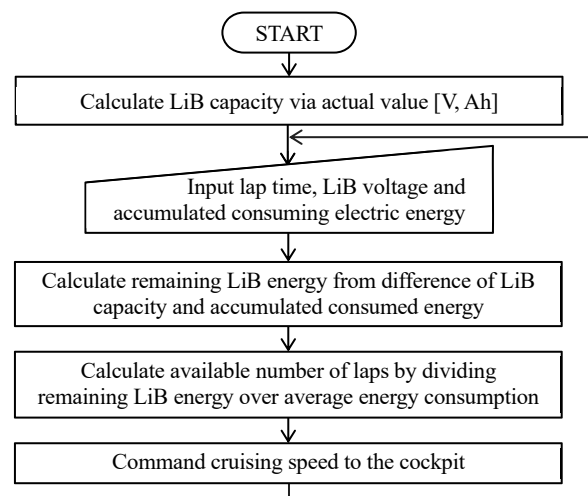


Fig. 14 Typical simplified flowchart for energy management and race control.

図 14 レース管理とエネマネ用典型簡易フローチャート

温度(晴・雨天時を想定した40℃と25℃の放電温度)にそれぞれ設定したLiBの放電電圧とSOC(定格電圧×実測Ahで算出、放電終止電圧で0%)の実験結果を用意した(Fig. 15)。3日間ノートラブルで晴天時のレースならば、LiBのSOCをおおよそ1/3ずつ使用する考え方を基本とする^{23, 24)}。

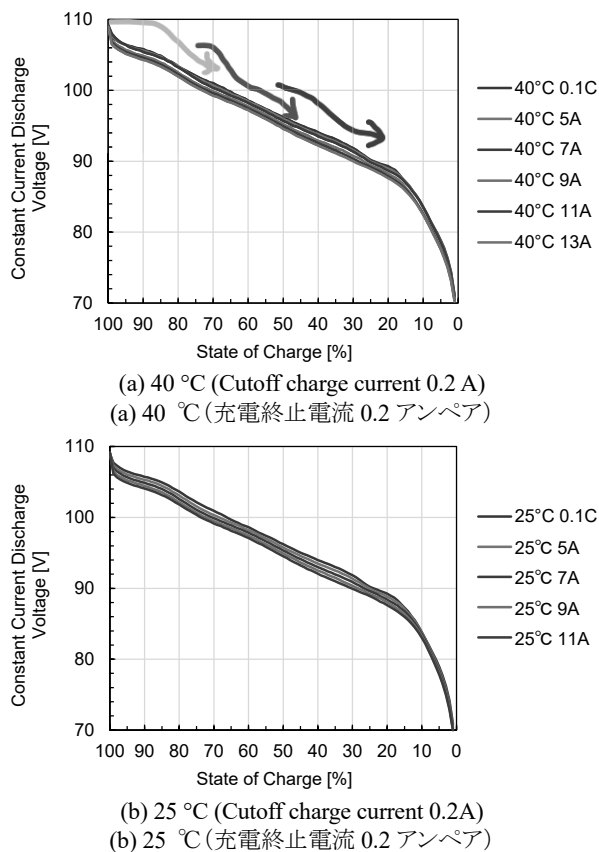


Fig. 15 SOC vs. discharge voltage of LiB
(0.1C discharge curve is approximate equivalent to OCV).
図 15 リチウムイオン二次電池の放電電圧と残量
(0.1C 放電曲線はおおよそ開放電圧に近似)

放電特性カーブの横軸のSOCを、3日間の競技時間と一致させた上で走行中のLiB電圧の推移が常に曲線の上を維持するようにPV電力によるエネルギー入力と走行速度の変化によるエネルギー出力の調整が適切に行われ、周回時間も安定するように運用できるとエネマネとしては安全率が高く、走行管理としても無駄や混乱が少ないといえる。初日夕方から3日目朝方までの日出没付近の太陽光充電によるSOCの回復具合と天候の悪化、不測の事態等もあれば考慮する。すなわち、Fig. 15(a)の黄・赤・茶矢印で示すように3日間のSOCとLiB電圧が推移するイメージで、初日は約8時間走行後に夕日と翌日の朝日で充電回復し、2日目は約9時間走行の後に夕日と翌日の朝日で充電回復し、3日目も約8時間走行して最終日のゴールとなる頃にSOCを20%程度残して終われるような展開が理想である。終盤も同じ速度で走行するにはLiB電圧が低下するほど電流の消費が増えることから、放電電圧が急降下する手前で完走できれば、計測誤差や中古モジュール電圧のばらつきがあっても安全な上、LiBの劣化も抑えられるからである。

なお、LiBの監視および保護に必要なBMS (Battery Management Syatem)には、市販のANT32S-100Aを取扱説明書通りに使用した。テレメトリから独立した構成であり、電流およびモジュール電圧の監視、SOCの把握および充放電終止電圧付近での警告音とLiB遮断、車速の表示に用いている(車載LCDやBluetooth接続したAndroidアプリを併用)。

5. エネルギーの使いどころとレース管理

周回時間 T と周回ごとのエネルギー消費量 E (および競技残り時間 R)を逐一把握した上で、エネルギー管理からレース管理へとつなげる必要がある。それぞれの積算値と平均値を求め、エネルギーベースの可能周回数 L と時間ベースの可能周回数 S とを算出し、両者を比較した上で少ない方に制限を受けることになる。Fig. 16はこの点に加えて競合チームとのギャップや競技残り時間 R ・エネルギー的なマージンも加味しつつ、熱中症・過労予防および競技規則に対応するためのドライバー連続運転時間 Z (1日に連続3時間)を、現ドライバーの運転時間に次の周回時間を加えた時間 X が超過しないようにすることを考慮したフローチャートである(それ以外に、日影でも走行するか、ピットエリアやスタート地点付近で夕日を用いて充電するかを選択肢等もある)。同図に含めるのが困難のためフローチャートには表現していないが、WGCにユニークな競技規則として、3日間のオーバータイムの累積を考慮したエネマネとレース管理も重要である。ここでオーバータイムとは、ピットロード出口の先にあるゲートの閉鎖後に各日のチェッカーまでに要する周回の時間[分]のことであり、累積が180分に達すると1周減算のペナルティとなるものである。同一周回ではオーバータイムの少ない方が勝者となり、オーバータイムが多くても1周でも多い方が勝者となる。このように、各チームの読みと駆け引きが重要になり、時間内に周回を終えて戻って来られないとエネルギーとペナルティの面で二重の損失となるため判断も試される(チームやエネマネの面では流れを読む機会となっており、観客視点からはWGCのレース展開の見どころにもなっている)。レース管理の問題として、走行時に自然減速で速度制限区間に合わせるようにするか、回生ブレーキと摩擦ブレーキを主で使うかがあり、バッテリー消費の激しいレース終盤では前者、ハイペースなレース展開では後者と考える。しかしながら、最終的にはデータの信頼性や他チームとのギャップ、ドライバーの熟練度やトラブルの有無等に大きく左右される。回生ブレーキは摩擦ブレーキよりメリットになるが、多用するとモーター温度の上昇やインバーター効率・バッテリーの充放電効率がエネルギーの流れとして往復でかかり、バッテリー内の分極等も生じるため見かけほどエネルギーが増えることにはならないので、これらを考慮することは課題となる。ゆっくり加速して瞬時電力を抑えるとPWMによる鉄損・スイッチング損等で効率低下を招き、平均速度の低下を最高速を上げて補えば空力損になる。急加速でも倍電流や電子進角等で効率は急激に低下し、熱放出やタイヤ摩耗も問題となるため、程よく滑らかに加速する技術(熟練)が必要である。現状ではドライビングインジケータの電流確

認用バーLEDの位置を目安としてモーターの効率のよい範囲やエネマネ上無理のない範囲を想定して伝える程度となっており、これらの点については詳細かつ具体的な議論の余地が残っている。ソーラーカー専用タイヤの製造販売が国内競技会向けでは数年前に終了しており、本学で僅かに所持するひと桁%の低転がり抵抗係数で軽量のタイヤのパンクを防ぐようなタイヤマネジメント(準備や運転、ピット作業)も求められる。

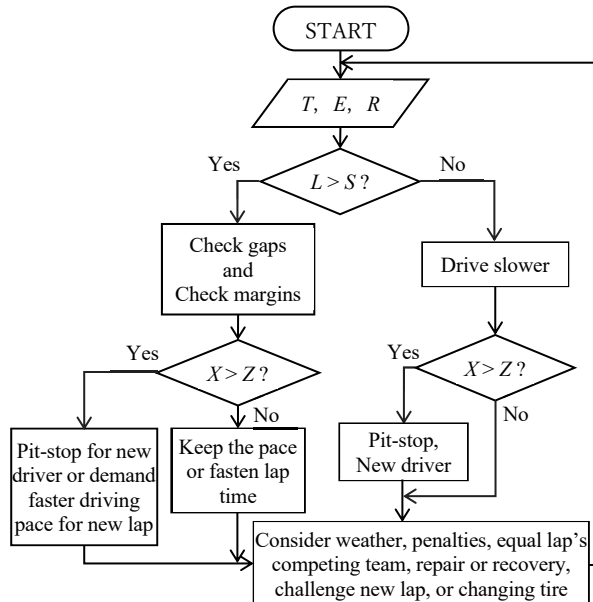


Fig. 16 Flowchart of the race command.
図 16 レース指示に関するフローチャート

Fig. 17はドライバーの最終通過時刻をチーム内で確認してドライバー交代の準備に役立て、ドライバーにはレースの走行速度や目標周回時間等の指示を与えるためのフローチャートである。Fig. 18は学生がWGCでの経験を活かしてExcelワークシート上にエネマネ計算を構築したもので、2024年の競技初日に実際に使用した表計算の例である(Fig. 17の基になっている)。前述の内容に加えて、消費した電流量AhとPVから供給したAhの比較も出来るようにしている。Fig. 18に関しては、発電の不良やバッテリーの劣化等の本学に多いトラブルを見越して、レース状況が許す場合には、晴天時になるべくLiB電圧を赤線上に維持して走るといった手法の温存型のエネマネも展開できるように現場が工夫している。雨天曇天や夕方の日影・低日射時には巡航速度を高く維持したままではバッテリー電圧がみるみる低下していくので、各日のレース終了後から日没までの太陽光による充電は可能であっても、基本的に安全マージンは重要となっている。近年では台風が東北地方にまで被害をもたらす傾向もあり、3日間安定した晴天を前提としたレースにはならないこともある。本学ではメンバー数や指導歴が少なく、パンクやバッテリー関係・車体カウル等のトラブルの頻度が高いという事情も関係している。その意味では、バッテリーやタイヤの問題傾向をテレメトリでも知らせて早めに対応することが重要になる。現在はBMSのモニターと市販のタイヤ空気圧モニタリングシステム(TPMS)を搭載して、運転席のドライバーが計器を読んで情報を補っているの、仮にテレメトリに集約できれば、競技中もド

ライバーの負担軽減と情報共有ができ、時系列記録も増やせて有用であろう。

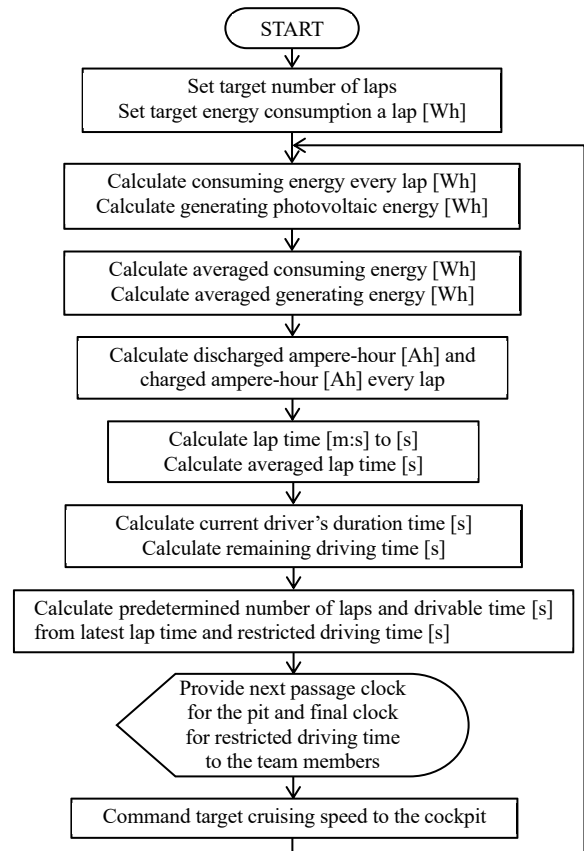


Fig. 17 Flowchart which provides important clock or time to the pit members and commands cruising speed to the cockpit driver.
図 17 重要な時間や時刻をピットメンバーに提示し、コックピットには巡航速度を指示するフローチャート

6. おわりに

920 MHz帯のLPWAの一種であるELTRES通信とクラウド連携したAndroid端末・Arduinoによる競技用ソーラーカーのためのテレメトリについて教育課題を兼ねて構築し実際に運用した結果を報告した。競技におけるテレメトリおよびエネルギーマネジメントを学生主体に行った結果、累積消費電力量の把握やエネマネシートは実際に有用であることを複数年のレース展開から確認できた。一方で、ELTRES通信用の外付け防水アンテナを導電性のCFRP内に設置し生じた電波減衰による通信途絶の低減と、空力特性やPVセル部分影の影響を顕在化させないアンテナ設置は課題として残された。効率の良い走行のための十分な理論検証やレース管理の際の的確な指示内容には議論の余地がある。WGCのように長い直線と速度制限区域のあるコースでレース管理を行う際は、Table 2に示す指示(区間ごとの目標速度、単純な最高速度、効率のよい巡航速度や出力の維持、ラップタイム、スプリットタイムまたは目印ごとの通過時刻等)が考えられ、加速条件や指示の複雑さ、運転の自由度も考慮して選択する必要がある。ドライバーの裁量で走り出してから状況に応じた指示を与える場合は、短く伝えやすい「〇〇アンペア以下で」や「気持ち速めで」、「前の車をフォロ

一」等の暗黙知を含む直感的な内容の指示も有効である。割り込み処理の観点では、アクシデントなどのリスク(確率的に予測できる不確実性)²⁵⁾を予見して、車両と情報通信の完成度、車両周辺の環境条件、ドライビングとピットワークの練度に応じてレース中の適切なエラー処理(サポートや善後策)を決めて事前に確認しておけば安心である。

Table 2 Example on the race control for the course with speed limit sector and long straight.

表 2 長い直線と速度制限区域のあるコースのレース管理の例

Command	Accel. function	Complexity	Flexibility
Target speed [km/h]	• Ampere limit	High	Low
Top speed [km/h]	• Lead angle	Low	High
Output [W] or [A]	• Power / Eco mode	Medium	Medium
Cruising speed [km/h]	• Responses for the Throttle / e-Brake	Medium	Medium
Lap time [m:s]		Low	High
Split time [m:s]		High	Low
Passage clock [h:m:s]	• Voltage protection for LiB	Volatile	Volatile

謝 辞

本学ソーラーカープロジェクトにご支援ご協力頂いた皆様方と、大会関係者の皆様方に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 木村英樹, 2011 型ソーラーカー“Tokai Challenger”の開発(電気編), 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, (Feb. 2012), 77-88, 代々木.
- 2) NEC, 衛星運用を支える地上システム, NEC 技報 2011 年 3 月号特集, Vol. 64, No.1 (accessed Nov. 12 2024), https://jpn.nec.com/techrep/journal/recommend_year/2011/03.html
- 3) 小山高専鹿野研究室, <http://kanoken.a.la9.jp/telem.html> (accessed Nov. 9 2024)
- 4) Yoshihiro Soutome, Electrical system of Solarcar Development of telemetoly, (Mar. 3 1996), Supervised by Fumihisa Kano, Electrical Controlling Engineering, Oyama National College of Technology.
- 5) Jun Saito, Hiroyuki Obara, Akira Ogawa, Measurement System of Solar Hydrogen Car “Apollondine”, Workshop on Solar Vehicles and Solar Bicycles 2004, PVB4,123-130, (Oct. 2024), Tamagawa-gakuen, Japan.
- 6) 盛谷亨, ソーラーカーの電気系計測装置と計測法について, 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, 85-90, (Feb. 2008), 芦屋.
- 7) 塚本 雄二, 遠隔監視用 PHS ワイヤレスセンシングモニタの開発<監視・計測業務の低ランニングコスト化に込えて>, 計測技術 2002 増刊号, Vol. 30, 15-16 (2002), 日本工業出版, Tokyo.
- 8) Yasuhiro Sudo, Toru Fujisawa, Development of Telemetry System for Solar Car Race SUZUKA, Journal of JSES, Vol. 45, No. 2 (2019), 97-103.
- 9) 木村英樹, 新型ソーラーカー“Tokai Challenger”の開発(電気編), 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, 53-70 (2010), 東京.
- 10) Kouichi Nakanishi, Masaya Nakamori, Koichi Araga, Application of LoRa radio modem measurement system for Solar Car, Research reports Kinki University Technical College, 13, (Mar. 2020), 41-43.
- 11) World Green Challenge, Crean Energy Alliance, (accessed Nov. 30 2024), <https://wgc.or.jp>
- 12) ソーラースポーツライン, 大潟村, (accessed Nov. 11 2024), <http://www.vill.ogata.akita.jp/archive/contents-52>
- 13) Y. Sudo, T. Fujisawa, T. Nagashima, Construction of telemetry using LPWA and energy management, Proc. of the Symp. on the Educational Application of Information Technology, (Mar. 2024), B-06, 45-46, Atsugi, Japan.
- 14) T. Nagashima, Y. Sudo, Telemetry system for solar cars using LPWA, RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, (Feb. 2024), 356-359, 28PM2-2-3, Honolulu, Hawaii, USA.
- 15) Sony Network Communications Inc., ELTRES™ (accessed Sep.27 2024), <https://eltres-iot.jp>
- 16) 藤澤徹, 須藤康裕, 製作のしやすさを考慮した KAIT Spirit の開発, 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, 47 (Feb. 2016), 高輪.
- 17) Y. Yamada, K. Igari, T. Fujisawa, H. Hayami, Real Time Monitoring System for Solarcar, Multimedia, Distributed, Cooperative, and Mobile Symp. 2013, (Jul. 2013), 4D-3, 953-963, Tokachigawa, Japan.
- 18) 神崎康宏, Arduino で計る, 測る, 量る, 134-164(2012) CQ 出版社, 東京.
- 19) Toru Fujisawa, Yasuhiro Sudo, STEAM Education and Win the Solar Car Race in SUZUKA utilizing IT (Operation and Prototyping of Racing Drivers' Information Indicator), Proc. of the Symp. on the Educational Application of Information Technology, (Mar. 2023), C-07, 75-78), Atsugi, Japan.
- 20) モバイルテクノ, 無線環境下における電波強度や品質の目安について (accessed Feb. 1 2025), <https://www.fujitsu.com/jp/group/mtc/technology/course/radionetworkarea/>
- 21) Sony semiconductor solutions corp., Communication Module C compatible with ELTRES™ (accessed Nov. 6 2024), <https://www.sony-semicon.com/ja/eltres/module.html>
- 22) WGC SOLARCAR RALLYE, Day1 Lap Time Report (accessed Feb. 5 2025), https://wgc.or.jp/WSR2023/pdf/23WSR_Day1L.pdf
- 23) Toru Fujisawa, Takehito Nagashima, Yasuhiro Sudo, Shizuya Suzuki, Energy Management and Telemetry for a Racing Solar Car with IoT using ELTRES, Proceedings of JSES conference, (Nov. 2024), 195-196, B4-57, Sapporo, Japan.
- 24) 須藤隆, 村上雅享, 田村俊介, OSU model S'の進化とエネルギー・マネジメントについて, 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, 71-80, (Feb. 2011), 芦屋
- 25) 荒井徹, 災害のリスクについて考えてみました, (accessed Mar. 14 2025), <https://toboe.onenote.co.jp/2018/03/30/>



Fig. 18 Spreadsheet for energy management and race control (day1 of the WGC2024).

図18 エネマネとレース制御のための表計算シート(2024年WGCの1日目)