

## § 電気自動車にみるエネルギーの有効利用

### § エネルギーの有効利用

子供総合科学館主催のチャレンジ・トゥ・ザ・リミットに参加した。真工高・科学部の電気自動車“イダテンGO”は5分間で57m走行して参加17台中、第7位でアイデア賞を受賞した。

チャレンジ・トゥ・ザ・リミットとは単一乾電池4本で体重50Kg以上の者が乗車し5分間に何m走行出来るかを競う競技会で、栃木県下のほとんどの工業高校が参加していた。

我々は大会の主旨を「有限なエネルギーをどの様にすれば有効利用できるか」と解釈した。“イダテンGO”はこの課題を研究するための評価用車両である。

真岡工業高校・科学部は過去数年間、研究テーマとして地球環境問題を選び、現在の環境を観測するため、自動気象観測システムを製作中であった。我々はエネルギー利用効率向上による環境破壊の軽減という側面での取り組みとしてとらえた。つまり、既存の技術・機械を電子制御技術等を駆使し最適条件で作動させることによる省エネ効果で、少しでも環境を汚染する速度を遅らせる意味をもっていると考え積極的に参加することに決めた。

我々の最終の研究内容は、小規模な風力、太陽光発電、水力発電等を組み合わせ未開発なエネルギー資源を開拓することである。規模が小さいことは我々の手で製作可能である。またこの研究結果による効率的なエネルギーの利用を技術的な前提と考えている。

環境の調査

地球環境問題

エネルギーの有効利用

(自動気象観測システム)

(チャレンジ・トゥ・ザ・リミット)

自然に優しいエネルギー資源の発掘

(μ・コジェネレーションシステム)

乾電池という極めて小さなエネルギー源で、人を乗せて走る電気自動車である。本当に走るのだろうかという素朴な疑問があった。我々はまず乾電池4本からどれだけのエネルギーを取り出せるのか。モータを効率よく使うにはどうすればいいのか。無線で電力の伝達にインピーダンスのマッチングの問題があるが、モータと電池、モータと駆動系との間でも同じ問題があるのではないかと考えた。以上の3点を研究内容としてエネルギーの効率的な利用を研究することにした。地球を乾電池に例えれば、地球のエネルギー資源の有効利用に通ずるものと確信した。

## § チャレンジ・トゥ・ザ・リミット参加までの電気自動車の状態

### 1 イダテンGOの製作

乾電池で動く電気自動車の製作を始めたとき、校内の先生方にアドバイスを求めると、“軽くすることが最も重要である”との意見が大勢を占めていた。さらに、乾電池ではまともに動かないでとの否定的な意見も多かった。

(1) 車重を軽くするだけで良いのだろうか？

本当に軽くするだけで良いのか？、最初に疑問に思った。大会の規定は50Kg以上のドライバーが乗車しなくてはならないとある。従って、車重が0でも、合計すれば50Kgになるのだから、本質的な問題は別にあると直感した。しかし、何が重要なのかは、電気自動車を作って確かめなくては判らないので取り合えず、電気自動車を試作することにした。そこで、まず部員全員で前回の大会の結果や、他校からの情報をもとに、製作を進める上での、主に技術的な意見を交わした。その中で出てきた意見をまとめてみたのが、次の文である。

- ・車体はとにかく軽く作らなくてはダメだ。(必ず誰もが口にする言葉である)
- ・体重を支える車輪と、駆動輪は別につけると良い(昨年優勝高のアイデア)
- ・ラジコン用のモータが強力で良いだろう。
- ・おもちゃのマブチモータでは絶対動かない。強力なモータでないとダメだ。
- ・チェーンはロスが多いから、タイミングチェーンの方がよい。
- ・車輪は小さい方が転がり抵抗が少ないだろう。
- ・車輪にタイヤを付けずにリムだけで駆動するとスリップして進まないぞ。
- ・リムだけのほうが転がり摩擦は小さいはずだ。
- ・とにかくギアで回転を落とすとトルクを大きくしないと進まない。
- ・乾電池4本じゃ人を乗せて動くはずがない。
- ・電池は温めたほうが良いだろう。
- ・電池の電圧が半分に電圧低下する状態で走行させると良い。
- ・電池は休ませながら使うと長持ちする

電気自動車を作る上で、これらの意見を全て満足する試作車を作ることは、時間的にも、また経済的にも、さらに我々の技術力からしても不可能である。そこで、簡単に製作でき、しかも、改良がしやすい構造の電気自動車を製作することにした。

(2) イダテンGOの概要

製作したイダテンGOは、棚用の穴あきL型アングルで車体を製作した。車体は全てボルトとナットで組み立て、簡単に構造を変更できるようにした。車輪は、ゴミ置き場から拾い集めてきた自転車のタイヤを利用した。

この写真がイダテンGOである。前輪2輪、後輪1輪の3輪車である。使用したモータは、軽自動車のワイパーに使われていた物をチェーンで減速して、後輪を駆動する方法を採用した。スプロケットとチェーンは10段ギアの自転車に使われていた物を廃物利用した。車重は17Kgになった。使った部品の多くが、廃品を拾い集めた"ガラクタ"であったので、次のメモのようなエピソードもあって、完成するまでに、色々な試行錯誤を、大会前日の夜まで繰り返した。



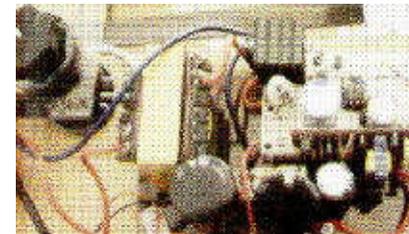
(3) ベアリングのボールが入っていない事件メモ

H3: 1/20 (水) 15:12:07  
 昨日の原因: 電池ボックスの接触不良  
 ↓  
 モータに加わる電圧が極点2.2Vの低下  
 電池ボックスの製作を行う。(直列の抜き)  
 座席前へ移動  
 足置場を取り付ける  
 奇器類をスプロケットの前へ  
 スプロケットは現状(小)維持  
 電圧計をメータとして設置  
 篠原 先生様(旧P)に後輪の修理を依頼す  
 Y.M.N.U.は材料(Y.S.R.……)  
 修理工具名: フトリ台、ニッパル回し  
 協力者: THE 篠原先生様(旧P) 自転車競技部  
 開ロベリクリ!! ベアリングが2個しかない!!  
 ドライバ-(番-)が座ると座席が車輪に触れてしまふ  
 ↑  
 意外な最大原因を発見!! 改善さる  
 H3: 1/21 (木) 16:44:45  
 遂に744m 走行!! (湯さんニッパル修理!!)  
 要因  
 ・各回転部に二酸化モリブデンの含有した潤滑をつくる  
 ・ベアリングを設置する。(2個→3個)

(4) 減速装置(ギア)が作れない

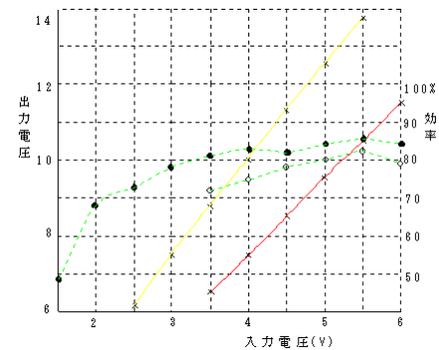
どんなモータを使えば良いのか迷った。前回の大会で優勝したチームはラジコン用のモータを使ったので、我々も同じモータを使おうと計画した。しかし、適当な減速器が作れなかった。また、どれだけ減速すれば良いのかも判らなかつた。結局、ラジコン用のモータを使うことはあきらめることにした。代わりに使ったモータは、軽自動車のワイパー用のモータである。ギアで適当に減速されているので、軸に自転車のスプロケットをつけて、そのまま利用できた。

(5) DC-DCコンバーターを作る



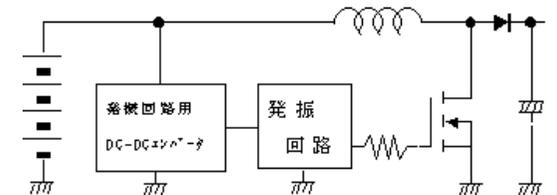
電池が最大電力を発生する条件がでは、電圧が十分に低下する。我々が採用したワイパー用のモータは定格12Vで、乾電池4本で滑らかに回るが、電圧が6Vでは不十分である。そこで、直流電圧を昇圧する電子回路を製作した。

この写真がDC-DCコンバータである。実際の走行ではスイッチの切り替えで、コンバーターで昇圧するか、直接モータと電池を接続するかを選択できる。また、昇圧比はボリュームである程度可変できるように設計した。



旧タイプDC-DCコンバータ  
 (昇圧比1.9倍、3.5V以下で動作停止)  
 新タイプDC-DCコンバータ  
 (昇圧比2.5倍、1.5V程度まで動作可能)

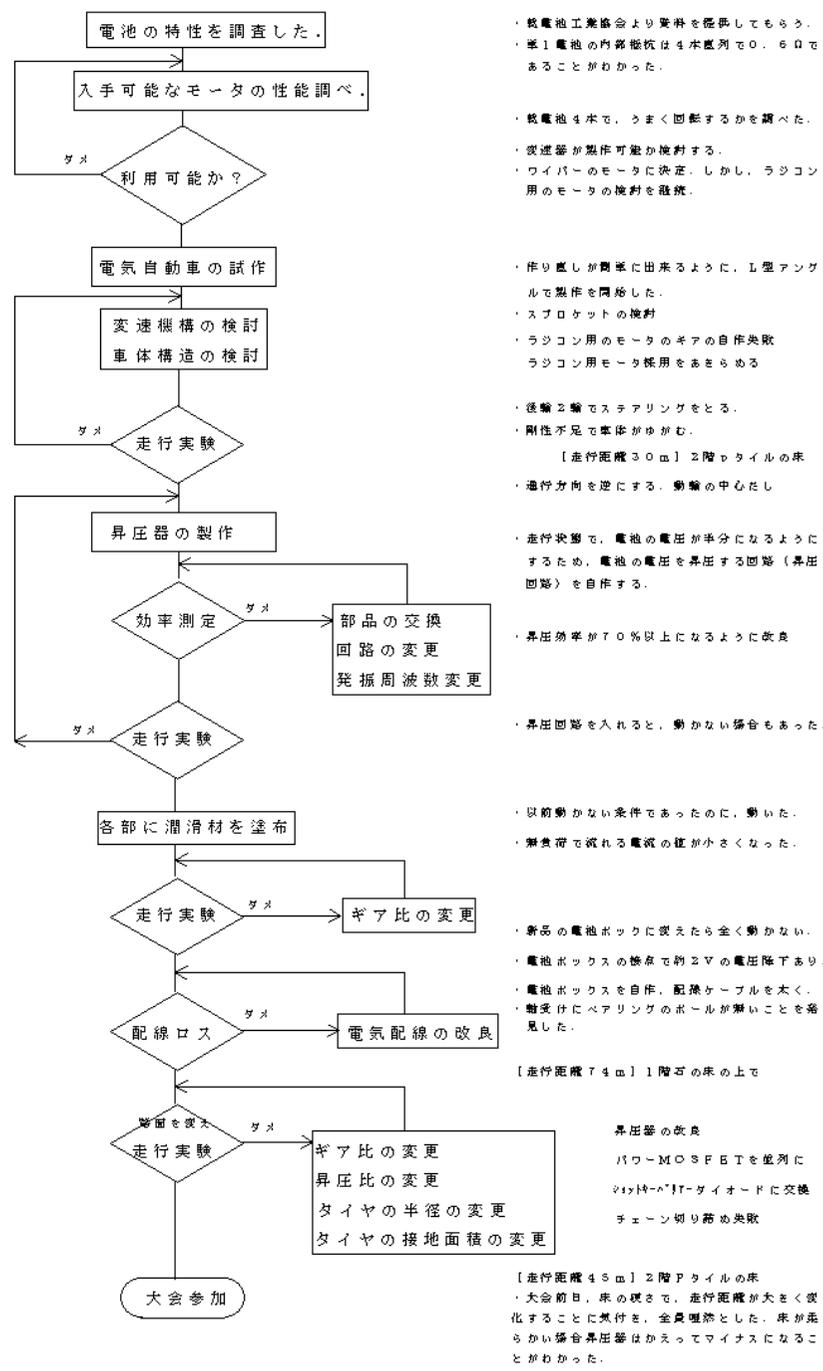
使った部品は最初、スイッチングレギュレーターから取り外したジャンク品を使ったが、効率が少しでも上がるように、FETとダイオードを購入して改良した結果、効率が左のグラフのように改善された。



新タイプのDC-DCコンバータは、旧タイプのスイッチング・トランジスタをP-MOS-FETに、ダイオードをファーストリッチャーからショットキー・バリア・ダイオードに変更した。更に発振器用のDC-DCコンバータを組み込んだので、電池の電圧が1.5V程度から動作するようになった。なお、イダテンGOに電池電圧と、モータの電圧を計る電圧計を設置した。

(6) 大会前日までの取り組み

大会前日までの研究の試行錯誤をフローチャート風にまとめてみるとこのようになる。



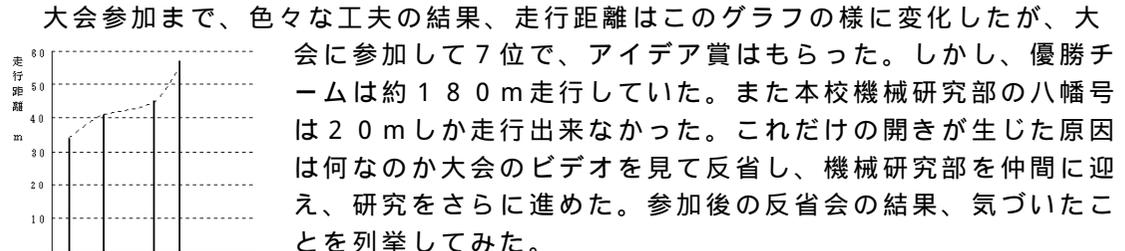
- ・ 乾電池工業協会より資料を提供してもらった。
- ・ ※ 電池の内部構造は4本並列で0.6Vであることがわかった。
- ・ 乾電池4本で、うまく回転するか調べた。
- ・ 変速器が製作可能か検討する。
- ・ ワイバーのモータに決定。しかし、ラジコン用のモータの検討を継続。
- ・ 作り直しが簡単に出来るように、L型アングルで製作を開始した。
- ・ スプロケットの検討
- ・ ラジコン用のモータのギアの自作失敗
- ・ ラジコン用モータ採用をまよらせる
- ・ 後輪2輪でステアリングをとる。
- ・ 剛性不足で車体がゆがむ。
- ・ [走行距離30m] 2階タイルの床
- ・ 進行方向を逆にする。駆動の中心だし
- ・ 走行状態で、電池の電圧が半分になるようにするため、電池の電圧を昇圧する回路(昇圧回路)を自作する。
- ・ 昇圧効率が70%以上になるように改良
- ・ 昇圧回路を入れると、動かない場合もあった。
- ・ 以前動かない条件であったのに、動いた。
- ・ 潤滑剤で流れる電流の値が小さくなった。
- ・ 新品の電池ボックスに変えたら全く動かない。
- ・ 電池ボックスの検点で約2Vの電圧低下あり。
- ・ 電池ボックスを自作、配線ケーブルを太く。
- ・ 軸受けにベアリングのボールが刺さることを発見した。
- ・ [走行距離74m] 1階石の床の上で
- ・ 昇圧器の改良
- ・ パワーMOSFETを並列に
- ・ シリコン1T-ダイオードに交換
- ・ チェーン切り器の失敗
- ・ [走行距離45m] 2階Pタイルの床
- ・ 大会前日、床の硬さで、走行距離が大きく変化することに気づき、全員退席とした。床が柔らかい場合昇圧器はかえってマイナスになることがわかった。

(7) 大会で注意したこと

大会に臨んで、我々は次の点に注意した。

1. 会場で走行する時に、電圧計の値を読んで、電池の電圧が無負荷の電圧の、半分になるように昇圧器のボリュームを調整する。
2. 大会前日にはじめて気がついたことに、”路面の堅さによって大きく走行距離が変化する”ことがあった。早めに会場に行って、路面の状態を確認する。
3. 路面の状況によっては、昇圧回路を使わない。
4. スプロケットの取り付け精度が悪いので、チェーンがはずれないように注意する。
5. 交通安全

(8) 大会の結果



- 大会参加まで、色々な工夫の結果、走行距離はこのグラフの様に变化したが、大会に参加して7位で、アイデア賞はもらった。しかし、優勝チームは約180m走行していた。また本校機械研究部の八幡号は20mしか走行出来なかった。これだけの開きが生じた原因は何なのか大会のビデオを見て反省し、機械研究部を仲間を迎え、研究をさらに進めた。参加後の反省会の結果、気づいたことを挙げてみた。
- ・ 宇工はすごく速いと聞いていたが、それほどでもない。石の堅い床で走行実験したからだろう
  - ・ ラジコンのモータに市販品のギアボックスを使っているのが多い。
  - ・ 好結果を出したチームの車は、ゆっくりとしたスタートだが加速していった。
  - ・ モータ・ギアの音を高らかにあげて進むチームが多かったが、我々の車は殆ど音がでない
  - ・ 我々の車が加速しないのは、ウォームギアを使ったからではないのか
  - ・ 予選より決勝での結果が良くなったのは電池が温まったからではないか。
  - ・ 優勝チームのグループと我々だけが電池ボックスを自作していた。市販の電池ボックス、細い配線ケーブルがいやに目だった。科学館の車は特に目立ち、かなりのロスが発生している。
  - ・ 6番目に走行したチームは急ぎょ電池にカバーをしたが、その結果最初なかなか始動出来ず、一周せずに止まったが、あれは間違いなく電池と電池ボックスの接触不良である。
  - ・ リムだけの車輪とゴムのタイヤを使ったチームと2つのグループに分かれたが、路面の硬さを考慮するとどちらが転がり抵抗が小さいのだろうか
  - ・ 半径の小さいものより大きい車輪のほうが転がり抵抗が少ないのではないか。
  - ・ 駆動輪と体重を支える車輪を分離したチームがあった、駆動輪の半径は小さいので、減速比を大きくしなくてすむのと、製作が簡単だからであると思った。
  - ・ 前輪2輪でステアリングをきった方がトラックぎりぎりを走れて良かった。

## §チャレンジ・ツウ・ザ・リミット参加以後

大会に参加して、イダテンGOの記録と、優勝チームの車には、あまりにも記録に大きな差がありすぎた。今までのように手探りの状態で電気自動車の研究を進めて行っても、限界があると反省した。そこで、もっと科学的に研究を進めることにした。

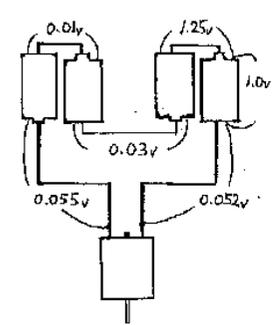
### イダテンGOと八幡号の比較

真岡工業から機械研究部の八幡号も大会に参加していたが、記録は20mと参加したチームの中では最下位に近い成績で、我々の3分の1しか走行していなかった。そこで、我々は機械研究部と共同で研究を進め、手始めにイダテンGOと八幡号を比較検討して、科学的に問題点を探ることにした。



左の写真が八幡号である。八幡号の構造は角パイプを溶接して作ったシンプルな車体で、質量は約7Kgである。前輪2輪、後輪1輪の三輪車で、前輪はおもちゃの乗用車のプラスチックの車輪で、後輪は自転車のタイヤを利用した。モータはイダテンGOと同じワイパーのモータを使っている。

八幡号を最初に見たときに、市販の電池ボックスを使っているのが目についた。我々は大会前、市販の電池ボックスを使って接触抵抗のために大きなロスを生じた経験があったので、この電池ボックスの問題点が浮かんだ。



電池ボックスの接触不良は、重要視しないチームが多かったが、大会で、我々の前に走行したチームは、我々が直列4本の電池を、筒状にした紙のケースに入れていたのを、電池を保温する為のものと思って真似をしたが、無理に紙で被った為に、電池の接触不良で、試験走行の時とは全く違った走行をして記録を大きく落とした。

そこで、八幡号の電池ボックスの各部分の電圧をデジタル電圧計で測定した。測定結果が左の図で、電池ボックスで約1Vの電圧降下が起こっていたことがわかった。また、八幡号はギアでモーターの回転を落としすぎた感じで、動輪の回転が異常に遅い。しかし、電池ボックスの接触抵抗のために、手でタイヤを押さえても、余りトルクが出なかった感じがした。

イダテンGOと八幡号の性能の比較を表にまとめてみた。

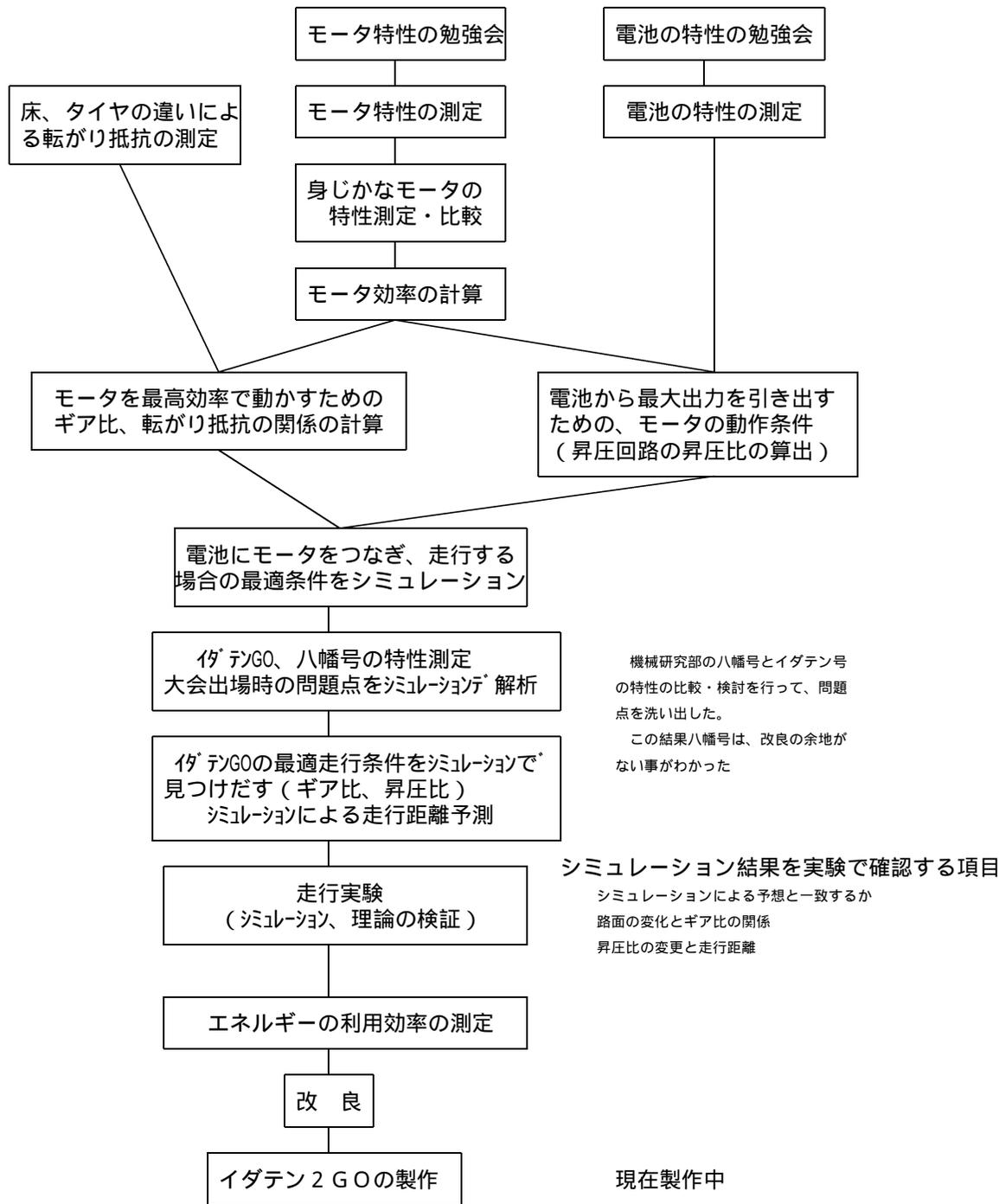
	イダテンGO	八幡号
所属	真工高・科学部	真工高・機械研究部
車重	17Kg	7.4Kg
モータ	ワイパー用モータ	ワイパー用モータ
減速機構	自転車用スプロケット、チェーン	自転車用スプロケット、チェーン
走行距離	63m	21m
特徴	<p>定格12Vのワイパーのモータに、DC-DCコンバータを自作し、6Vの電池の電圧を昇圧して加え、電池から効率よく最大電力を引き出す工夫をした。</p> <p>走行中は、電池の電圧をモニターし、最適な条件で走行しようと考えた。</p>	<p>全て廃品を利用して製作した。デザイン、加工技術には絶対の自信があった。大会ではアイデア賞をねらった。</p>
問題点	<p>工作精度悪く、ときどきチェーンがはずれる。大会前に、乗車したままチェーンをかける特訓をしたほどである。</p> <p>床の硬さで記録が大きく変化する事実は、体験していたが、ギア比をどうすれば良いのかわからず、10段階に切り替えられるようにしていたが、大会では調整できなかった。</p>	<p>電気関係の配線が悪く、接触抵抗のために、かなりの電力を無駄にしていた。</p> <p>また、必要以上に減速している。これは出場以前に真面目な走行テストをしていなかった為であると思う</p>

### 本質的に、イダテンGO、八幡号のどこに問題があるのか？

この問題を解決するために、次のフローチャートのように研究をすすめた。

## - 大会後の研究の流れ -

大会参加後は、次のフローチャート示す手順にしたがって、色々な実験、測定を行い研究を進めた。



## 実験内容

- モータの特性の勉強
  - 詳しくは科学部新聞を参考のこと。
- 電池の特性の勉強
  - 詳しくは科学部新聞を参考のこと
- 電池の特性の測定
  - 入手可能な複数の電池で実験し、電池の特性を調べる。
  - ・電池の電圧 - 電流の測定（内部抵抗, 最大出力の測定） --すべり抵抗器で電流を可変し、電圧降下と電流を測定する。
  - ・温度を変えた場合の内部抵抗の測定-----電池をお湯で暖め、温度を変えて の実験を行う。
- イダテンGO、機械研究部の八幡号の特性の測定
  - ・車の質量
  - ・転がり抵抗の測定（石の床、Pタイルの上。タイヤをはいた場合、リムだけの場合）
- モータの特性の測定
  - 殆ど廃品だが、回収したモータの特性を測定して違いを明らかにする目的に実験
  - ・最高回転数とそのときの電流（無負荷電流）の測定
  - ・停止時のトルク（最大トルク）の測定 -----トルクは軸につけてアームにバネばかりつけて測定
  - ・巻線抵抗の計算、トルク定数の計算、逆起電力定数の計算 -----この時の電圧と電流から巻線抵抗の測定をする。
- モータの効率の計算（手計算）
  - ・回転数 - トルクの直線からモータの出力の計算-----出力は回転数 (rpm) × トルク (g・cm) × 10<sup>-5</sup> で計算出来る。
  - ・モータのエネルギー変換効率の計算 -----トルクと電流は比例するのでモータ出力 ÷ 電源出力で計算する
- シミュレーションによる解析
  - 測定したモータ、電池の特性をもとにしてシミュレーションを行い最も効率の良くなる条件を探す。
  - ・電池の内部抵抗とモータの効率のシミュレーション  
モータの最高効率となる電流値を電池の最大電力となる電流値と一致させるための昇圧比シミュレーションで求める。
  - ・転がり抵抗の値とモータの特性から最適ギア比をシミュレーションで探す。
- 走行実験
  - ・測定した諸特性から5分間の走行距離をシミュレーションする。
  - ・エネルギーの利用状況を測定する。

大会出場前のように、手探りで電気自動車を製作しても、結局大きな記録の更新は難しいことがわかった。製作技術的な問題と、理論的な間違いによるのかを判断する必要がある。

理論的に効率よくエネルギーを利用するため、この図の手順で研究を進めた。

## 電池の理論

(科学新聞からの抜粋)

### 電池の容量

一番疑問に思う事は、乾電池にどれだけのエネルギーが蓄えられているかだと思います。電池は使い方によって寿命が大幅に変化するので単純にはいきませんが、単一電池をを1Aの電流で放電すると約1時間放電可能なことから、電池の容量を概算すると

$$\text{容量} = 1.5 \text{ (V)} \times 1.0 \text{ (A)} \times 3600 \text{ (S)} = 5400 \text{ J}$$

### 電池の内部抵抗

乾電池の電圧は1.5Vあります。しかし、負荷をつなぎ電流を流すと必ず電圧は低下してしまいます。この変化を電圧降下とよんでいます。電流に比例して電圧が低下する現象からオームの法則をあてはめると、電池の内部に抵抗成分が存在することが判ります。この抵抗を内部抵抗とよびます。

### 負荷抵抗の値と負荷での消費電力

電池から最大の電力を引出すには、適当な値の抵抗を負荷につなぐなくてはなりません。

ナショナル製、ネオハイトップ(単一)電池は内部抵抗が実測で約0.15Ωあるので、4本直列で約0.6Ω、無負荷の電圧が6.0Vですから、色々な値の抵抗を接続した時の抵抗で消費される電力を計算して表のまともてみましょう。

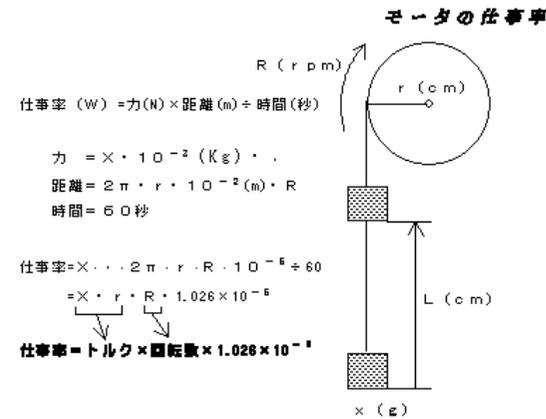
抵抗	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
電流	10A	7.5	6	5	4.3	3.8	3.3	3.0	2.7
電圧	0V	1.5	2.4	3	3.4	3.8	4.0	4.2	4.4
電力	0W	11	14.4	15	14.6	14.4	13	12.6	11.9

上の表が、色々な抵抗値の負荷抵抗をつなぎ、負荷で消費される電力を計算したものです。表から最大電力を引き出す負荷抵抗の値は電池の内部抵抗と同じ場合であることがわかります。

自動車が動いたとして、もっと早く動くか、それとも限界なのか?どの様なことで判断すればよいのでしょうか。今までの話でわかったと思いますが、モーターに流れる電流を測定すれば判断が出来ます。つまり一定の速度で走っている状態で電流を測定したところ1.5Aであったとすれば、電池から最大電力を引き出すには5Aですから、まだ余裕があることとなります。実際にベストな状態は、電池の電圧をはかっておいて、無負荷の時の電圧の半分の電圧に電圧降下している時です。

## モータの理論

(科学部新聞からの抜粋)



モーターが発生する仕事率は回転数とトルクの積になります。左の図と式が仕事率を計算するための概念図です。モーターの発生する仕事率は

$$\text{仕事率} = \text{トルク} \times \text{回転数} \times 1.026 \times 10^{-5}$$

(W) (g.cm) (rpm)

で計算することができます。

モータのトルクは停止しているときに最も大きなトルクを発生し、回転数が上がると発生するトルクが減少する

### 特性を

持っています。またトルクは、ほぼ完全に電流に比例し、モータに加わっている負荷の大きさは流れている電流を測定することで判断できます。

直流モータは発電機としても動作します。モータに電圧を加えて回転させる場合でも、モータが回転すれば電圧が発生し、そのぶん電池との電位差が少なくなり、モータには電流が流れずらくなります。モータに発生するこの電圧を逆起電力といい、逆起電力は回転数に比例します。

モータの特性をここで数式を使ってまとめてみましょう

トルク  $T_r = T \cdot I$  . . . . .トルクは電流に比例する。

逆起電力  $V_r = K \cdot n$  . . . . .逆起電力は回転数に比例する。

仕事率  $P_m = G \cdot T_r \cdot n$  . . . . .モータの出力はトルクと回転積に比例。

モータに流れる電流 . . . . .電池の電圧から逆起電力を引いて

$$I = (V - V_r) \div R_m \quad \text{モータの巻線抵抗で割り算した値。}$$

以上のことからモーターのトルクは

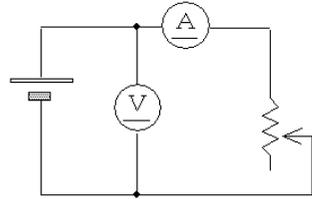
$$T_r = \frac{T(V - K \cdot n)}{R_m}$$

出力は 
$$P_m = \frac{G n T (V - K \cdot n)}{R_m}$$

出力の式を見ると、回転数nの2次式になっています。従ってある回転数のときにモーターの出力が最大になることがわかります。

# 1. 電池の特性の測定

何種類かの乾電池の、流す電流と、その時の電圧を測定し、電池から得られる電力を測定し、更に最大電力を発生時の電池の内部抵抗を計算した。この測定は温度



を変えて測定した。測定回路は次の回路で行った。電池を収める電池ボックスは、自作したボックスで、接触抵抗が最小になるように、十分に圧力をかけ接触させた。また配線に使った電線も十分に太い、無酸素銅を使ったものを使用した。なお比較のために、市販の電池ボックスを使って同じ測定を行い比較した。

## 測定結果

12/12 16:14

日立GOLD、  
市販品の電池ボックス  
1 7

電流	電圧	電力
0.8	5.0	4.0
1.0	4.3	4.3
1.4	3.9	5.5
1.8	3.3	5.9
2.0	3.2	6.4
2.4	2.8	6.7
2.8	1.9	5.3
3.0	1.3	3.9

( A ) ( V ) ( W )  
12/24

松下NEO赤  
自作電池ボックス  
1 8

電流	電圧	電力
0	6.0	
1.0	5.3	5.3
1.5	4.9	7.4
2.0	4.5	9.0
2.5	4.1	10.3
3.0	3.6	10.8
3.5	3.1	10.9
4.0	2.5	10.0
4.5	1.9	8.6

12/24

日立GOLD  
自作電池ボックス  
1 8

電流	電圧	電力
0	6.5	
1.0	5.3	5.3
1.5	4.7	7.1
2.0	4.2	8.4
2.5	3.6	9.0
3.0	3.1	9.3
3.5	2.2	7.7
4.0	1.7	6.8
4.5	1.0	4.5

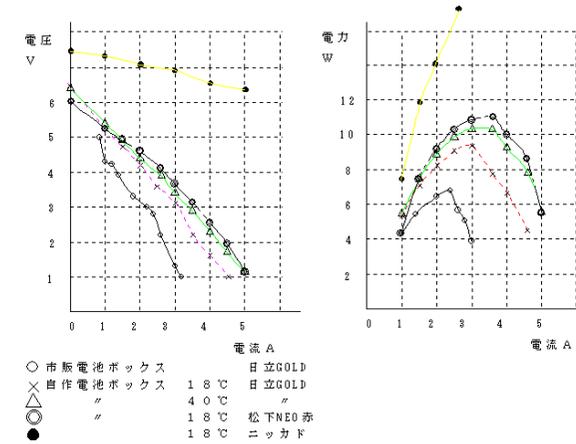
ニッカド電池

電流	電圧	電力
0	7.5	
1.0	7.4	7.4
1.5	7.2	10.8
2.0	7.1	14.2
2.5	7.0	17.5
3.0	6.9	20.7
3.5	6.7	23.5
4.0	6.6	26.4
4.5	6.5	29.3

## 最大電力発生時の内部抵抗

	内部抵抗	電力 W
市販電池ボックス H社製電池	1.54	6.7
自作電池ボックス H社製電池	1.13	9.3
" 40 に加熱	1.00	10.2
自作電池ボックス N社製電池	0.83	10.9
ニッカド電池	0.22	29.3

この図は、測定結果をグラフにして比較しラジコン用のニッカド電池の特性も測定したが、乾電池とは全く違った特性である。



## 測定結果のまとめ

### 市販電池ボックスで30%の電力ロス

1. 市販の電池ボックスを使うと約0.5 程度の接触抵抗が増加する。この結果最大電力が約30%減少する。推定であるが、大会第3位の今市工業チームは市販の電池ボックスであったが、もし電池ボックスを自作し30%のエネルギー増加があったとすれば単純計算で200m走行して第1位であったかもしれない。

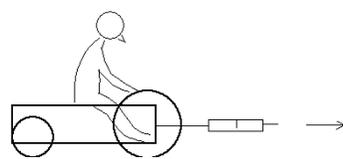
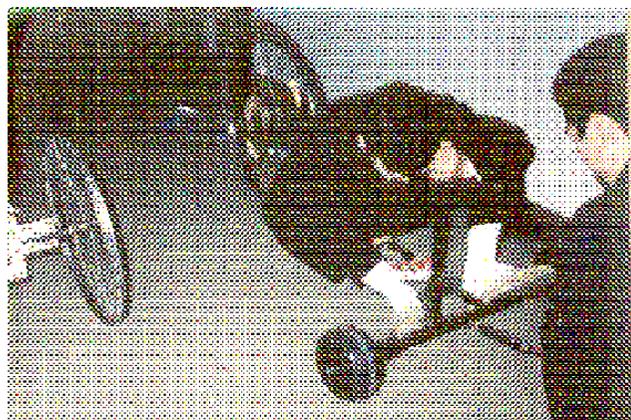
### 電池は温度で大きく電力が変化する

2. と を比較すると、電池は温めたほうがより多くの電力を取り出せることがわかる。特に大電流領域で顕著である。実験ではビニールの袋に入れ40のお湯に約10分間浸し温め、電池表面で少しひんやりする程度に温まっていた。それでも顕著な差が生じた。大会では、決勝で全てのチームが記録をのばしたが、室温で電池が温まったためと考えられる。(0.4% ,16% ,1.1% ,32% ,8.4% ,23% それぞれ記録が伸びた。)

### 単電池4本は10W程度の電力

3. 単1マンガン乾電池4本から引き出せる最大電力は10W程度である。1秒間に10Jのエネルギーしか取り出せないから、かりに転がり摩擦が10Nあったとすると、100%進むためにエネルギーが使えたとして、理論的な最大速度は1m/sとなる。

## 2. 転がり抵抗の測定



**測**

**定方法**

一定の力で、10秒間自動車を引っ張り、この間の移動距離を測定し、転がり抵抗を次の計算式で計算した。

L (m) : 10秒間の移動距離

M (kg) : 車体 + ドライバーの質量

F (N) : 引っ張る力

a : 加速度

f (N) : 転がり抵抗

T : 引っ張る時間 = 10秒

$$a = \frac{F - f}{M}$$

$$L = \frac{1}{2} a T^2$$

$$f = F - \frac{2 L M}{T^2}$$

	イダテン	イダテン	八幡号	八幡号
車の質量	17Kg	17Kg	7.4Kg	
トライアル質量	47Kg	58Kg	47Kg	
引っ張り力	19.6N			
10秒間の 走行距離	9.73m 9.82m 9.89m 9.84m	9.92m 10.22m 10.87m 11.54m	10.63m 10.28m 12.58m 11.64m	11.38m 10.95m 10.87m 10.85m
平均	9.82m	10.63m	11.46m	11.20m
転がり摩擦 (kgf)	7.9N (0.79)	3.7N (0.37)	7.1N (0.72)	7.4N (0.76)
	リムのみ	タイヤ付	リムのみ	タイヤ付

**真岡工業本館、2階Pタイル**

での転がり抵抗の測定結果。

測定は、この表のように測定を5回行い、平均して10秒間の走行距離を求めた。

	イダテン		八幡号
車の質量	17Kg		7.4Kg
トライアル質量	47Kg	58Kg	47Kg
引っ張り力	14.7N		
10秒間の 走行距離	10.81m 11.21m 11.21m 11.24m	7.17m 7.30m 7.67m 8.50m	10.06m 8.80m 8.80m 8.80m
平均	11.14m	7.71m	9.05m
転がり摩擦 (kgf)	8.44N (0.845)	3.14N (0.32)	4.9N (0.50)
	リムのみ	タイヤ付	リムのみ

本館1階の石の床の上で測定

**測定結果のまとめ**

床によって転がり抵抗は大きく変化する

イダテンGOの場合、リムだけの時、2階のPタイルでの転がり抵抗は7N、これに対して、1階の石の床では0.44Nであり、約20倍の違いがある。したがって、大会前、床によって記録が変化するのはこのためである。しかし、20倍の違いがあるのに、走行距離は1.7倍程度の違いにしかならないのは不思議である。

八幡号の変化は小さい

イダテンGOと比較すると、八幡号の転がり抵抗は大きな変化はない。この理由は、前輪に使ったおもちゃの車輪の軸にベアリングが入っていない為で、軸の部分で大きな摩擦が生じるためである。

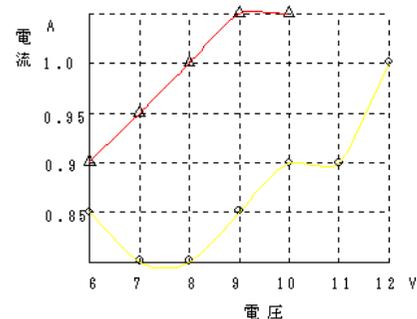
リム VS タイヤ の転がり抵抗

イダテンGOの測定結果をみると、石のように、路面が極めて硬い場合、リムだけの場合の方が、タイヤをつけた場合より、遥かに転がり抵抗が少なくなる。しかし、Pタイルのように比較的軟らかい場合、タイヤを付けた場合のほうが小さくなる。したがって大会の時に、リムだけかタイヤをつけた方が良いのかは、一概に結論づけることはできない。しかし、大会会場の床は、比較的硬いPタイルのようであったので、競技用の自転車のタイヤのような、空気圧が十分に高い、硬いタイヤの場合、リムだけより有利になると思う。

### 3. モーターの特性の測定

#### 無負荷電流の電圧依存性

無負荷で流れる電流は全く出力にならず無駄に消費されるエネルギーである。この電流の値はどのような性質を持っているか八幡号に使ったモーターで電圧を変えながら、流れる電流を測定した。



△ : 大会に参加した状態での無負荷電流  
○ : 一度分解し、潤滑剤を塗布した状態

電流は駆動輪を空転させた状態で測定した。従って伝達ロスもこの電流に含まれている。

#### 測定結果

ほぼ一定の電流が流れる

無負荷電流は、オームの法則に従わず、あまり電圧に関係せず、一定の値が常に流れていると考えられる。この電流の値は、摩擦等の影響が反映されていると考えられるので、潤滑剤の塗布でこのように大きく変化するとと思われる。さらに、変速器等によって生じる負荷も、この電流に含まれるので、ギアやタイヤの軸受けの調整は、この電流の値を見ながら行い、最も少なくなるようにすればよいと思う。

#### モーターの特性

手元にあった色々なモーターの特性を測定した。



測定項目

は

- 無負荷電流 6Vの電圧を加えた時の、無負荷の場合にモータに流れる電流。
- 無負荷回転数 無負荷の時のモータの回転数。
- 停止トルク モータの回転を停止させた時、モータが発生する最大のトルク。
- 巻線抵抗 停止トルク測定時に加えた電圧、電流から計算した電気抵抗。

	無負荷電流 A 6V	無負荷回転数 RPM 6V	停止トルク g·cm	電圧 V	電流 A	巻線抵抗
マフチRE-280	0.40	15000	149	6.0	6.0	1.0
" RE-36	0.43	13000	-	6.0	6.0	1.0
テープレコーダ-用	0.047	3000	143	6.0	0.68	8.8
ラジコン用モータ	1.6	13000	369	2.7	7.7	0.35
ワイパー-モータ大	1.6	1500	2217	6.0	7.4	0.81
ワイパー-モータ小 イグテン	0.60	23	20000	6.0	4.9	1.2
マフチRS-380PH4535	0.60	12000	860	4.8	25.0	0.19

注) 1.ワイパー-モータ小 イグテンは、イグテンGOに取り付けた状態(チェーンで減速した状態)で、後輪の所で測定した値である。

2.マフチRS-380PH4535は、カタログに出ている値を転載した。

#### 測定結果のまとめ

無負荷電流は、テープレコーダーのモーターのような、高精度なものほど小さい。また、ワイパーのモータでも、潤滑剤を塗布することで小さくできる。なおワイパーのモータには整流子が3つある。このうちの使わない1つを取り去ると、摩擦が減り、無負荷電流は小さくなる。

ラジコン用モータは巻線抵抗が小さい

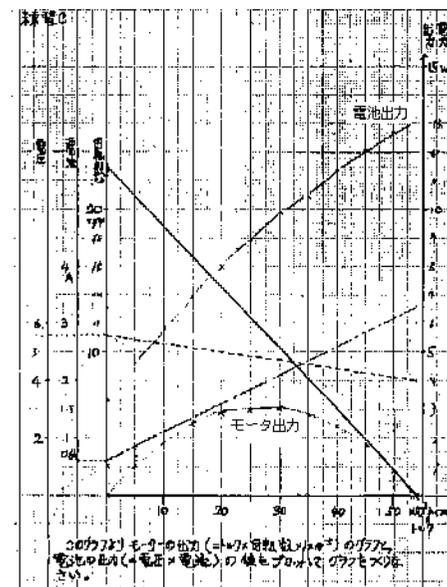
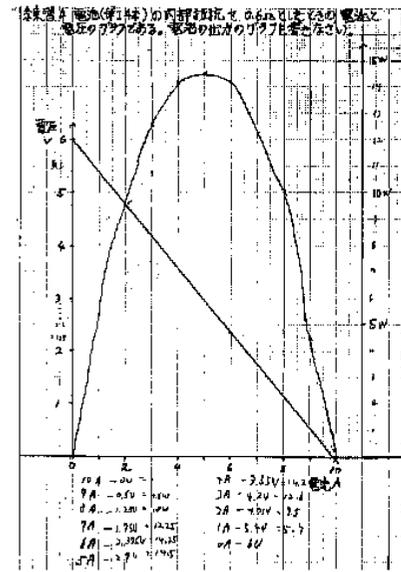
ラジコン用のモータは、無負荷電流が大きく、巻線抵抗がたいへん小さい。従って乾電池で動かすには問題があると思う。

## 4. モータの効率の計算

色々なモータの特性を測定したが、電池につないで回転させた場合、電池からどれだけのエネルギーを引き出し、どれだけの出力を発生できるのか計算した。

### 電池の出力

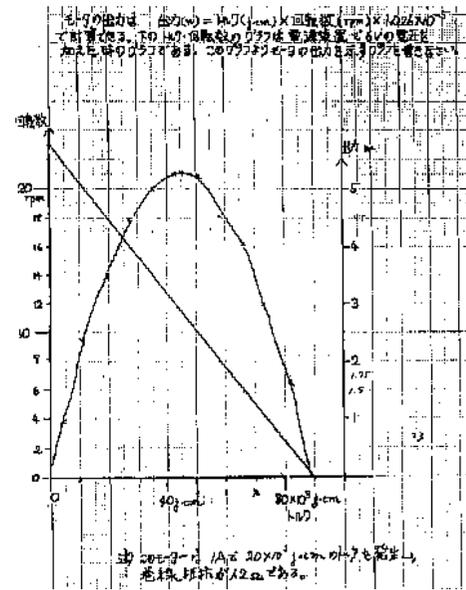
電池の内部抵抗を0.6 としたときの電流と電圧から電池の出力を計算したグラフである。



### モータの出力

モータの出力を出力(W)=トルク(gcm) × 回転数(RPM) ×  $10^{-5}$  で計算した。

モータのトルクは電流のみで決まる。回転数はトルクの変化で直線的に変化する。従って、回転数とトルクの直線のグラフをもとに発生トルクに対して出力がどのように変化するか計算した。



### モータと電池の出力

左のグラフは、内部抵抗0.6の電源に、巻線抵抗1.2・トルク定数 $20 \times 10^3$  gcm/Aのモータ(イダテンGOのモータ)を接続したときの、電池の出力、モータの出力を計算したグラフである。

この計算から、このモータでは、電池からどのようなギア比でも、最大電力を引き出すことができていないことがわかる。

イダテンGOのモータは電池に直接接続しても、電池の電力を引き出せない

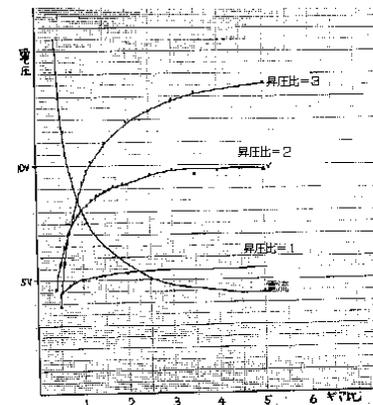
計算の結果から、「モータと電池の出力」のグラフを見ると、モータが最大出力を発生する時、電池の出力は最大出力となっていないので、イダテンGOに利用したモータを直接電池に接続して回転させても、乾電池4本から、最大電力を引き出せないことが理論的にわかった。

### 実際の走行でのモータの出力

実際の走行に際して、モータはどれだけのトルクを発生するかを考察すれば、転がり抵抗によって生じるトルクとつりあった状態で回転すると考えられる。このトルクは、転がり抵抗が一定ならば、減速機のギア比によって変化するので、ギア比をかえることは、モータの発生するトルクをかえる作用があることになる。従って、ギア比を変えるとことで、モータが最高出力を発生する状態に、条件を選ぶことができる。しかし、グラフを見ると、この状態では、電池は最大出力を発生していないので、最高速度で走行していることにはならない。

### ギア比、昇圧比

ギア比をかえただけでは、電池から最大電力を引き出せないので、別な工夫が必要になるが、ここで昇圧比を変えた場合、どのように電池の出力が変化するか計算した。昇圧比をかりに2倍とすると、エネルギー保存の法則から、電流は半分になる。このことは、モータから見ると、電池の電圧は2倍になるが、内部抵抗が、昇圧する事によって4倍になることを意味する。このような理論に基づき、計算した。



左のグラフが計算結果で、横軸にギア比、縦軸に電圧、電流を目盛った。電流はモータに流れる電流、電圧とはモータに加わっている電圧である。

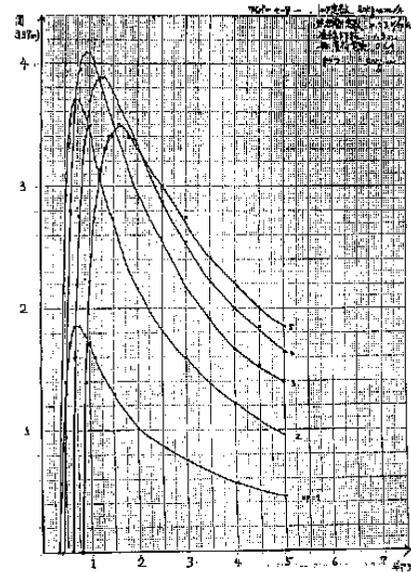
モータに流れる電流は、モータが発生するトルクで決まるので、ギア比によって自動的に決まり、昇圧比には関係ない。しかし、電池の発生する電力は、電流 × 電圧であるから、昇圧比が高いほど大きくなる。しかし、注意しなくてはならないことは、ギア比の小さいとき、つまり大きなトルクが必要なときの

電圧のグラフを見ると、内部抵抗の増加による損失が顕著になり、昇圧比が大きいほど、電圧が低下していることである。

## 軟らかい床では昇圧器は逆効果

このグラフから、モーターが大きなトルクを発生する時、言い替えれば、大きな電流が流れるときは、昇圧器によって内部抵抗が増加するので、損失が増え、電池の出力が減少し、逆効果になる。大会前の走行実験で、軟らかい床での走行では昇圧器を入れるとうまく動かないことがあったのは、この理由からである。

イダテンGOのモーターを使って、昇圧比、ギア比を変えると5分間の走行距離がどのように変化するか計算した。計算に使った諸定数は



トルク定数 :  $20 \text{ Kg} \cdot \text{cm} / \text{A}$   
 逆起電力定数 :  $0.23 \text{ V} / \text{RPM}$   
 巻線抵抗 :  $1.2$   
 無負荷電流 :  $0.6 \text{ A}$   
 転がり抵抗 :  $20 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$

また、ギア比を変えればモーターが発生するトルクが変化し、昇圧比が変われば電圧が上昇し、逆に内部抵抗が上昇するという原理で計算し、モーターのトルクがわかれば回転数が求められるので、5分間の走行距離に換算した。

注) ギア比が大きいは、大きく減速する事で、回転数は小さくなるが、最大トルクは大きくなることを意味する。

このグラフから次のことが読み取れる。

昇圧比が高ければ良いということではなく、最適値が存在する。この場合約3倍程度で最高の走行距離が実現できる。

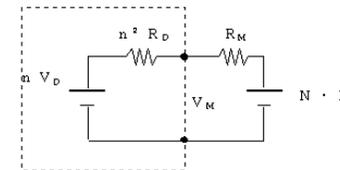
昇圧比を高くするほど、最低限動くために必要なギア比が、大きくなっていく。

ギア比も最適値があり、この最適値は昇圧比によって変化している。

ギア比が大きくなると、徐々に走行距離が減少するが、ギア比を小さくすると急に走行距離が小さくなり、ついには動かなくなる。

## シミュレーションの製作

電池の特性、モーターの特性から、路面の状況に応じてどのようなギア比、昇圧比にしたら良いのかをシミュレーションで調べた。DC-DCコンバータを電池とモーターの間に入れると、電圧を2倍にすると、モーターから見た電池の内部抵抗は4倍になること、ギアで2分の1に減速すると、最大トルクが2倍に、無負荷回転数が2分の1になることを考慮して、グラフを書いて調べると、条件を変えて走行距離を見積るのにかなりの時間を必要とするので、シミュレーションプログラムを作り調べことにした。



### 【シミュレーションの原理】

$V_D$  : 電池電圧                       $n$  : 昇圧比  
 $R_D$  : 電池の内部抵抗                 $V_M$  : モーター電圧  
 $R_M$  : モーター巻線抵抗               $I_M$  : モーター電流  
 $N$  : モーターの回転数                 $I_f$  : 無負荷電流  
 $K$  : モーターの逆起電力定数         $T$  : モーターのトルク定数

モーターに加わる電圧  $V_M$  は

$$V_M = R_M I_M + N K$$

モーターに流れる電流は

$$I_M = \frac{n V_D - N K}{n^2 R_D + R_M} + I_f$$

モーターに加えられた電力  $w$  は

$$w = I_M V_M$$

モーターのトルク

$$\text{トルク} = (I_M - I_f) T$$

モーター出力

$$\text{出力} = (I_M - I_f) T N \times 1.026 \times 10^{-5}$$

以上の値を計算してグラフをプロットさせた。トルクを共通の横軸をとおして重ねて表示させるようにしてある。実際の走行ではモーターのトルクと転がり抵抗とがつり合った状態で走行する。そこで、その時の回転数から走行距離を計算するプログラムである。

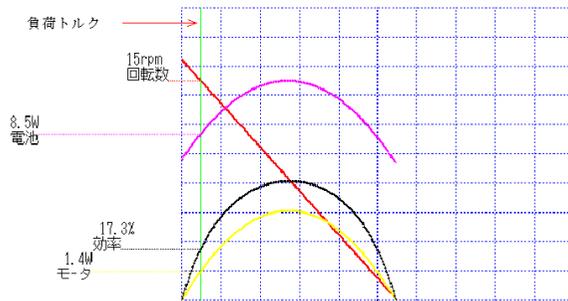
モーター、電池、路面の特性(転がり抵抗)を示すパラメータを設定して、最高の状態にするにはギア比、昇圧比をどの値にするかを調べることができる。なおこのシミュレーションの正しさは、大会出場の時のギア比・昇圧比等の基礎データから得られる結果を、大会での結果と比較して確かめることができる。また、ベストの条件では、何m走行させることができるかを理論的に探ることができる。

## 5. シミュレーションによる解析

シミュレーションプログラムにより、イダテン号、八幡号の大会でのエネルギー利用状況を、測定したモータ、電池の特性を使い、どれだけ有効に使われたかを解析した。

大会会場の転がり抵抗は不明なので、イダテンGO、八幡号ともに7Nと仮定した。なお以下のグラフの横軸はトルクで、比較するために2台の車について、同一スケールで表示した。

【イダテンGO】



- 諸特性 -

- ・無負荷電流 0.6 A
- ・巻線抵抗 1.2
- ・トルク定数 2.0 Kg·cm/A
- ・逆起電力定数 0.23 V/RPM
- ・昇圧比 2.5 倍

シミュレーション解析による、大会

での電池、モータの出力、モーターの効率、及び、予想走行距離は

- ・電池の出力 8.5 W
- ・モータ出力 1.4 W
- ・効率 17.3 %
- ・最大トルク 110 Kg·cm
- ・予想走行距離 70.7 m (大会での走行距離 62.7 m)

シミュレーション結果は正しい

この表のように計算される。この結果5分間の予想走行距離は70.7mと計算された。計算ではDC-DCコンバーターの変換効率を100%としているので、実際は80%程度の効率であるから、単純計算で $70.7 \times 0.8 = 57m$ となり、シミュレーションは大変良く、大会の結果を再現している。

ギア比の設定ミスであった

この結果を見ると、電池は8.5Wの電力を発生しているが、モータは効率の悪

い状態で回転しているので、1.4Wの出力しか発生していない。この原因は、ギア比の設定が悪く、モータに十分な負荷がかかっていない為である。

もっとモータに負荷をかけるような条件、つまりギア比を小さく設定すれば、モータの出力は上がって、走行距離は長くなったはずである。

【八幡号】



- ・無負荷電流 0.9 A
- ・巻線抵抗 1.9
- ・トルク定数 5.1 Kg·cm/A
- ・逆起電力定数 0.76 V/RPM

・電池の出力 6.4 W

- ・モータ出力 0.6 W
- ・効率 10.5 %
- ・最大トルク 約70 Kg·cm
- ・予想走行距離 28.3 m (大会での走行距離 20.9 m)

八幡号の走行予想距離は28.3mであるが、大会では約21mであった。この理由は、実際の走行では、電池ボックスでのロスがかなりあった為だと思われるので、妥当な値である。従ってこの結果を見てもシミュレーションは正しい結果を出していることがわかる。

八幡号の改造は無意味 -----八幡号の研究は終了

イダテンGOと八幡号の大会でのシミュレーション結果を比較すると、八幡号のモータの出力曲線は、たいへん偏平な曲線で、どの様に条件を変えても、ほとんど走行距離は変化しない事が解る。この原因は、モータの巻線抵抗、無負荷電流が共に大きい為に、モータを直接電池につないでも、モータが電池から十分にエネルギーを引き出せないためである。さらに、八幡号の前輪にはベアリングが入っていないので、転がり抵抗も大きく、モータや構造の根本的な改造を行わなくては、記録を更新することは難しいことがわかる。以後、八幡号の改良は行わないことにした。

### イダテンGOの予想最高走行距離

八幡号に対して、イダテン号は、昇圧器が入っているので、電池から効率よくモータにエネルギーを供給できている事が解る。無負荷の時の電圧の半分に電圧が降下した場合、最大電力を発生する事を考慮して、DC-DCコンバーターを製作したからである。しかし、シミュレーションによる解析で、ギア比の選び方が間違っていたために、高速走行できず、記録が伸びなかったことが判明した。そこで、最適な条件を、シミュレーションで探してみることにした。その結果

転がり抵抗 = 7 N      電池の内部抵抗 = 0.8      の場合  
 ギア比 = 約 0.6      昇圧比 = 2.5 倍      とすると走行距離は最高

になることが解る。次のグラフがその状況を示したものである。電池の出力、モータ出力それぞれの最大値が、同じトルクの位置にきている。つまり電池が最大電力を発生し、モータは最高の効率を発生するトルクで回転する。そして、そのトルクの大きさが、転がり抵抗によって生じるトルクとつりあって走行する。



シミュレーションによる解析で、判ったことは、イダテンGOの場合、走行距離を左右する要素は、昇圧比とギア比である。そして、最高の効率で走行させるために、次のようなことを考慮してギア比、昇圧比を決定すればよい。(大会でのギア比が3で、ギア比を小さくすると高速に回転する事を意味する)

### 効率よくエネルギーを使うには

実際の走行では、モータが発生するトルクと、転がり抵抗とがつり合う状態で走行すると考えられる。最大トルクの半分のトルクで、モータは最大出力となるから、走行状態で発生するトルクが最大トルクの半分になるようにギア比を選ぶ。

走行状態でモータに流れる電流の大きさが、電池が最大電力を発生する電流の大きさと一致するように昇圧比を選ぶ。

以上のように条件を選ぶと、エネルギー効率が最大になる。この状態で

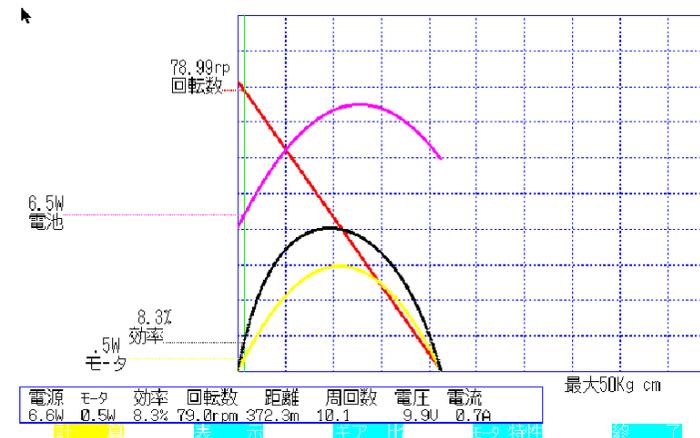
電池の出力 = 11.3 W      ・最大トルク = 22 Kg · cm  
 モータ出力 = 4.5 W      ・無負荷回転数 = 82 rpm  
 モータ効率 = 40.4 %

となり、シミュレーションでは予想走行距離が210mと計算される。ここで、DC-DCコンバーターの効率を80%と仮定すると、走行距離は168mと見積もられる。

この予想値はイダテンGOのデータをもとにした値である。しかし、大会会場の床の転がり抵抗は、7Nより小さい可能性が強く、また、電池の内部抵抗も温度によって大きく変化する等の問題もあるので、実際にはこれ以上走行することも考えられる。しかし、注意する点として、最大トルクをかなり小さく設定しているため、少しでも路面に勾配があると、止まってしまうことが考えられる。

### 本館1階での予想走行距離

本館1階の床は、材質が石で硬く、イダテンGOの転がり抵抗は0.44Nと大変小さい。この条件で、最高の効率で走行させるためには、小さなギア比を設定する必要がある。そこで、理想的な値よりは大きい、現在保有する最小のギア比、0.5の設定では、どれだけ走行できるか計算した。



計算結果は、走行距離が372mで、この時の電池の出力が6.5W、モータの出力が0.5Wで効率が約8%である。効率が悪いのはギア比の設定が不適切なためである。

## 6. 走行実験

### 5分間の走行実験でのエネルギーの流れ

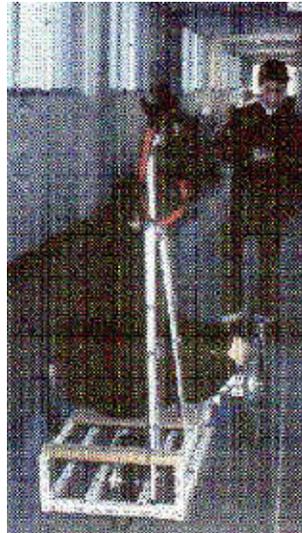
シミュレーション結果の検証と、実際に5分間の走行で、どれだけ電池はエネルギーを発生し、電池が発生したエネルギーをがどれだけ有効に使ったかを調べる実験を行った。

#### 実験方法



実験方法は、自動車に電圧計、電流計を取り付け、車体に取り付けたビデオカメラで走行中の変化を録画、同時に走行距離を読み上げ録音する方法を使った。解析は、録画したビデオを再生し、画面に表示される内臓の時計をもとに、音声で記録されている走行距離から速度を計算する。同時に電圧計、電流計の値を読んで、電

力の時間変化をまとめた。ただし、実験2では速度が速すぎて、走行距離を読み上げる間がなかったが、ビデオに写っていた、床に張ってある一辺40cmのタイルの通過時間を、コマ送りの回数で数えて、速度を計算した。(1回のコマ送りは1/30秒である。)左の写真は、イダテンGOにビデオカメラを取り付けている時のものである。また右の写真は測定を行っている時の写真である。



#### 実験1

2階のPタイルの床で、5分間の走行実験を行った。

この実験での条件は

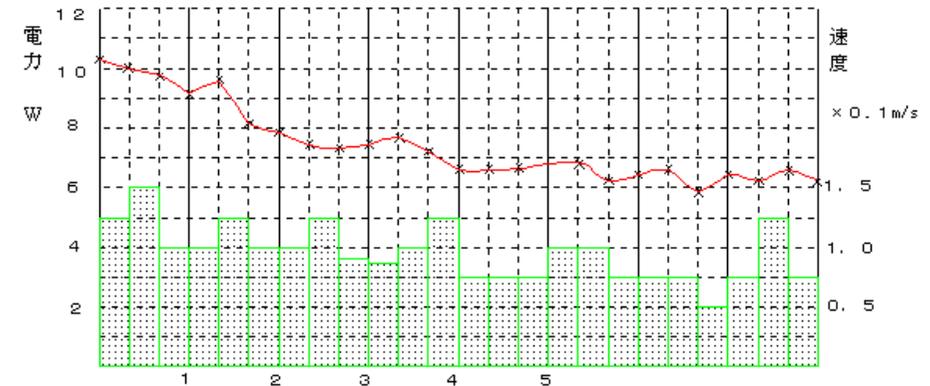
走行場所：2階Pタイル      気温：9  
使用電池：日立GOLD      昇圧比：2倍      ギア比：3（大会出場の状態）

注意

この日は気温が低く、電池を若干暖めたが、電池の出力はかなり小さくなると思われる。また大量に購入した日立GOLDは、ナショナルの赤電池より内部抵抗が大きい。2階の床は、転がり抵抗が大会会場と同じ程度であると思われるが、凸凹がかなりあり、止まってしまうようになる。また、廊下の状態が大掃除の影響で、以前と変化している。50m直線コースを使用して測定した。

#### 実験結果

5分間で31m走行した。同じギア比で45m走行したのに比べて距離が減っているが、この理由は気温の低下による電池出力の低下が関係している。(大電流が流れない、内部抵抗の増加)



電池の平均出力電力は8.15Wであるので、5分間の発生電力量は2445Jとなる。Pタイルでの転がり抵抗は約7Nであったから、31mの走行で自動車が行くために使った仕事は217Jである。なお、加速して平均速度0.1m/sになるために使った仕事は0.32Jで無視できる。勿論空気の抵抗も無視できる。したがって、電池が発生したエネルギーで走行のために使われた割合は

$$= 8.9\%$$

と計算される。シミュレーションではモータ効率が17%で、昇圧器の効率が75%程度なので

$$\eta = 13\% \quad \text{となる。}$$

#### 実験2

本館1階でのシミュレーションによる解析では、なんと約380mも走行すると計算されているので、実験で確認することにした。実験の条件は、

走行場所：1階石床      気温：9  
使用電池：ナショナルNEO赤      昇圧比：2倍      ギア比：0.5

1階大理石の床での転がり抵抗は、約0.44Nである。ギア比を0.5、この値は、保有するギアでは最高速になる値に、変更して実験した。シミュレーション解析では、この条件で平均速度約1.3m/s、走行距離約380mと計算されている。

注意

気温が低いので電池をドライヤーで暖め行ったが、40℃以上に温まっていた。

## 実験結果

253m走行した!

実験の結果5分間でなんと253m走行した。70mの直線コースで測定したので、再スタート時に一定速度になるまでに、時間のロスがかなりある。平均速度は各区間で定常状態になった時、約1.0m/sであるから、5分間で300m程度走行すると見積もられる。シミュレーション結果と比較すると、DC-DCコンバータの効率を80%程度と考えれば、304mが予想走行距離となるので、たいへんよくシミュレーション結果と一致している。



折り返しのコースを走行したので、電池のエネルギーにもロスが生じ、停止していた自動車が約1m/sの速度になるには、運動エネルギーを計算すると、約32Jのエネルギーが必要になる。電池の出力の変化をみると始動時に大きな電力を発生しているのはこのためである。

実験結果から、電池が発生した電力量は5分間で約3465

J、転がり抵抗から計算される253mの走行で使われたエネルギーは115J、4回の再スタートで使われたエネルギーの合計が128Jであったので、走行に利用されたエネルギーの合計Eは

$$E = 115 + 128 = 243 \text{ J}$$

であるから、電池の出力に対する割合、つまり利用効率は

$$= 243 / 3465 \times 100 = 7\%$$

と見積もられる。

自動車の質量を軽くする事が最重要という意見が多いが、停止・加速を繰り返す場合たいへん重要な要素になる。この実験の例では、一定速度になるために使われたエネルギーの方が、走行で使われたエネルギーを上回っている。

シミュレーションによれば、理屈の上ではギア比を更に10倍ほど小さくして、高速回転させて、走行したほうが理想的な条件である。したがって、300m近く走行したのに、31mの走行結果の実験より、効率が悪いのはこのためである。

## 7. 反省

単1乾電池4本に蓄えられているエネルギーを単純に5400Jと見積もったが、もしこの量が正しければ、実験1では50%、実験2では64%のエネルギーが消費されたことになる。(実際の電池のエネルギーは5400Jより多いと思われる)

乾電池から引き出せるエネルギーは、気温等の条件によって大きく変化するので、最適条件を設定するのは難しいが、ギア比等の機械的、電気的条件を最適にすると大きく走行距離が変化する。このことは、コンピュータ等を使って、上手に制御することで、エネルギーを節約できることを意味している。



この写真は、実験で使った乾電池の山である。条件をそろえるために、5分間の走行実験ごとに、新品の電池に交換したので、このように沢山の電池を使ってしまった。省エネルギーの研究で、このように大量の電池を消費してしまったことは矛盾していると反省している。これらの電池は、まだ半分以上のエネルギーが残っているのに、部員で分配して、懐中電灯などに使っている。

乾電池のエネルギーを5分間で使い尽くすことは、乾電池の特性から考えて無理がある。しかし、ここで得た技術と理論は、もっと余裕のある電池で利用すれば、高性能の電気自動車を作る基礎になると思う。

## 8. まとめ

今までの研究の結果、乾電池で動く電気自動車を動かすときのポイントをまとめてみると次のようになる。

### 電気自動車製作のポイント

モータは効率の良いものを選ぶ、ただし、最高効率を発生する電圧、電流が乾電池の能力以内であることが重要である。単純に考えると、無負荷電流の小さなモータを探すとよい。

ギア比は転がり抵抗によって生じるトルクの2倍が、最大トルクとなるように選ぶ。できれば路面の勾配等によって負荷が変化するため、変速器があればさらに良いと思う。

走行状態で、電池の電圧が無負荷の時の半分の状態であれば、電池は最大出力を出している。この状態が実現できないときは、昇圧器を間にいれて、昇圧比を調整してこの状態を作り出す。

配線はできるだけ太い電線を使う。更に市販の電池ボックスは接触抵抗が極めて大きく利用できない。電池との接触は、点接触で、十分に圧力をかけて接触する電池ボックスを自作するとよい。

以上のような点に注意すれば、電池は最大出力を発生し、モータは最大出力で回転する、さらに、この時の回転はモータが最高効率で動作することになる。

このような結論に達したが、研究の結果、製作当初、疑問に感じたことに対して、今までの研究の結果、次のような答が得られた。

### 疑問に対する解答

- ・車体はとにかく軽く作らなくてはダメだ。

競技会のルールでは、50kgの人が乗って、平坦な路面を一定速度で走行するのであるから、必要以上の軽量には意味がない。イダテンGOの場合でも、1m/sの速度に達するために消費されるエネルギーは30J程度なので、その他の要素のほ

うが重要である。

- ・ラジコン用のモータが強力で良いだろう。
- ・おもちゃのマブチモータでは絶対動かない。強力なモータでないとダメだ。
- ・とにかくギアで回転を落としトルクを大きくしないと進まない。
- ・体重を支える車輪と、駆動輪は別につけると良い

モータの特性と、路面の転がり抵抗、そしてギア比の関係の研究から、理論的な解答を得た。上記のポイント ~ にのよようにすれば良いことが解る。

- ・車輪は小さい方が転がり抵抗が少ないだろう。
- ・車輪にタイヤを付けずにリムだけで駆動するとスリップして進まないぞ。
- ・リムだけのほうが転がり摩擦は小さいはずだ。

転がり抵抗は、路面が硬い場合は、リムだけのほうが小さくなる。しかし、柔らかい床では逆にタイヤをつけた方が抵抗は少なくなる。また車輪の半径が小さいと、軸受けの摩擦の影響が顕著になり、転がり抵抗は大きくなる事を、実験で確認した。また、リムだけの場合スリップする心配は、モータのトルクから考えてありえない。

- ・乾電池4本じゃ人を乗せて動くはずがない。
- ・電池は温めたほうが良いだろう。

電池を暖めると、明らかに最大出力は増加する。この事実から、電池を断熱材で被うと、自己発熱による出力増加が見込まれる。

- ・好結果を出したチームの車は、ゆっくりとスタートしたが加速していった。
- ・我々の車が加速しないのは、ウォーム・ギアを使ったからではないか。

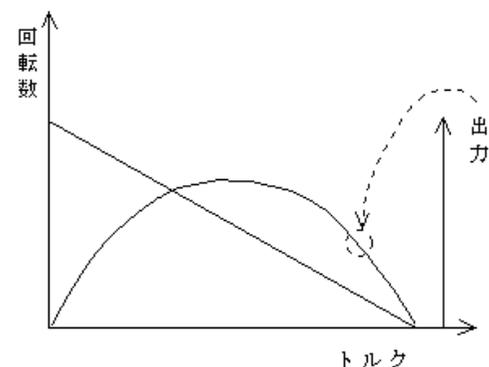
この疑問は大会終了後の反省会で提起されたが、ポイント が解答である。つまり、我々の車は、ギア比を大きく取りすぎたのが原因であった。また上位入賞チームは理想的なギア比に近く、したがって、転がり抵抗に釣り合う大きさより少し大きめのトルクを発生していたので、ゆっくり動きだし、加速していった。

以上のように、抱いていた疑問は、ほぼ研究の結果解決する事が出来た。

## 9. 考察

### ギア比の選び方

モーターの出力は、回転数×トルクで計算できる。ギアで回転数を落とすと、トルクは大きくなるが、回転数は減少するので、結局出力は変わらない。しかし、負荷の加わった状態では、負荷トルクと釣り合ったトルクを発生した状態で回転するのだから、この回転数が最もモーターにとって出力が大きくなる回転数になるようにギア比を選ぶことが必要になる。



縦軸にモーターの回転数、横軸にモーターにトルクを目盛ると、モーターのトルクは停止しているときに最大、最大回転数のときゼロで、この間を直線的に変化する。従って、回転数×トルクで、モーターの出力を縦軸にとってプロットすると上に凸の2次曲線になり、最大トルクの半分のトルクを発生しているときに、最大出力を発生することが解る。つまり、負荷トルクがモーターの最大トルクの半分になるようにギア比を

選べばモーターを最大出力で動作させることができる。

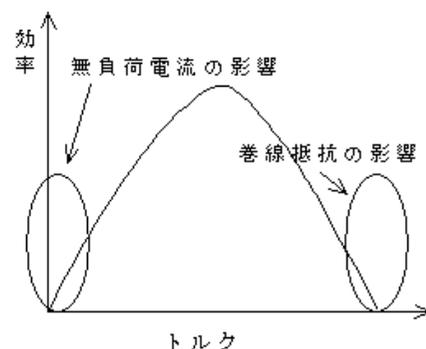
### 昇圧比

モーターの出力とは別に、モーターの効率を考えないと、電池のエネルギーを有効に利用できない。モーターの効率は、負荷がかかっていないときに流れる電流：無負荷電流と、モーターの巻線抵抗が大きく関係する。

無負荷電流はモーターの摩擦や空損（空気抵抗）等で生じる負荷に対して流れる電流であり、トルクをあまり発生せず、高速で回転するときには顕著になる。

これに対して巻線抵抗により生じる損失は、大きな電流が流れる時、つまり大きなトルクを発生して、低速で回転する場合に目だってくる。

この相反する要素から、ある特定の回転数



で損失が最小になり、モーターの効率が最大になる。

昇圧することは、巻線抵抗の大きなモーターを電池で駆動するときには有利になる。色々な規格表をみると、巻線抵抗の大きなモーターは無負荷電流が小さく、最大電流に余裕の無い乾電池で駆動する場合に無駄が少なく有利であるが、電池の内部抵抗に比較して、巻線抵抗が大きく電池からモーターへのエネルギーの変換効率が低くなる。（注意：電池の内部抵抗＝巻線抵抗の時に最大電力を引き出すわけではない）そこで電池とモーターの間に昇圧器を入れると昇圧比をNとすればモーターからみた電池の内部抵抗は $N^2$ に上がるので、昇圧比を調整すると電池から最大電力を引き出すことができるようになる。電気回路でインピーダンスのマッチングの問題があるが、昇圧器はインピーダンスの違う装置の間に入れてマッチングをとるトランスの役目をしている。

電源を乾電池ではなく、ニッカド電池などを使って走行する電気自動車を作る場合も、走行状態によってギア比を選べば、小型のモーターでも加速の良い走行を実現でき、さらに、勾配のある路上を走行する時は不可欠である。また、ニッカド電池などは、内部抵抗が小さく大電流を流す事が出来るので、最大電力を発生させる為に昇圧回路をいれて、電圧を昇圧させる事は更に有効になる。イダテンGOを乾電池ではなく、ラジコン用のニッカド電池を使って走行させたときは、昇圧回路の効果は絶大で、危険を感じるほどのスピードがでた。

乾電池で動く自動車の製作は、エネルギー源である乾電池が極めて貧弱で、色々な工夫が必要となるが、同じように太陽電池をエネルギー源として使う場合に有効に利用できる思う。