

電気自動車における省エネルギー性
および
利便性向上に関する研究

2008年3月
大阪市立大学大学院
工学研究科

あしだ たかし
芦田 隆

の研究

タイトル 電気自動車における省エネルギー性 および 利便性向上に関する研究

目次	頁
第1章 緒言	1
1-1 電気自動車の歴史と電気自動車を取り巻く社会環境	1
1-2 省エネカーに関する研究	2
1-2-1 省エネカーによる燃費競技	2
1-2-2 省エネカーの性能向上に関する研究	3
1-3 レンジエクステンダー (RXT) 電気自動車システムの実用性能に関する研究	3
1-3-1 けん引用電気自動車の開発	3
1-3-2 被けん引式発電車 (レンジエクステンダー: RXT) に関する研究	4
1-4 乾電池を動力源に高速走行を目指した小型電気自動車の研究	4
1-4-1 ニッケル系一次電池を動力源とした目標時速 100km の小型電気自動車の動力設計	4
1-4-2 ニッケル系一次電池を動力源とした目標時速 100km の小型電気自動車用電源の最適化設計	5
1-5 電気自動車における速度変化特性と使用電力との関係	5
第2章 省エネカーの性能向上に関する研究	6
2-1 はじめに	6
2-2 車輛の走行抵抗	6
2-3 操舵装置の研究	8
2-3-1 開発した操舵装置	8
2-3-2 操舵装置の機構と操舵の概要	10
2-3-3 操舵装置の有効性	12
2-4 電動車の回生システムの研究	13
2-4-1 回生システムの概要	13

2-4-2	回生システムの有効性の確認	15
2-5	まとめ	17
第3章	レンジエクステンダー (RXT) 電気自動車システムの実用性能に関する研究	18
3-1	電気自動車	18
3-1-1	研究の目的	18
3-1-2	車両の製作と性能評価の方法	19
3-2	RXT システムの製作	20
3-2-1	けん引用電気自動車の製作	20
3-2-2	けん引用電気自動車主要諸元・性能	22
3-2-3	経済性 (燃料費)	24
3-2-4	けん引用電気自動車についてのまとめ	24
3-2-5	自動車の航続距離	25
3-2-6	レンジエクステンダー (RXT) とその類似方式	25
3-2-7	被けん引用発電車の製作	27
3-2-7-1	RXT 用発電トレーラの製作	27
3-2-7-2	発電機と内燃機関の選定	29
3-2-7-3	車枠・車体の開発	31
3-3	製作したレンジエクステンダー (RXT) システムの評価	35
3-3-1	走行性能試験	35
3-3-2	EV とレンジエクステンダーシステムを構成したときの車両諸元	39
3-3-3	性能評価試験	41
3-3-4	目標達成の検証	43
3-3-4-1	被けん引式発電車のコストと総重量	43
3-3-4-2	目標とした各項目の検証	43
3-3-5	プラグインハイブリッドとの比較	44
3-3-6	自動車の日常的使用状況とその影響	45
3-3-9	結論と考察	47
3-2-3	電池特性確認と電源システム	

第4章	ニッケル系一次電池(オキシライド乾電池)を動力源とした目標時速 100kmの小型電気自動車の動力設計	48
4-1	はじめに	48
4-2	車体の開発	49
4-2-1	軽量かつ安全で性能の良い車体の開発	49
4-2-2	軽量コンパクトで効率の良いモータおよび駆動系の開発	50
4-2-3	転がり抵抗の少ない専用タイヤの開発	51
4-2-4	安全性	51
4-3	車体の設計と製作	51
4-3-1	車体計画・設計	51
4-3-2	車体製作	55
4-3-2-1	マスターモデル製作	55
4-3-2-2	雌型製作	57
4-3-2-3	車体成型	57
4-3-2-4	組み立て	58
4-3-2-5	試運転	58
4-4	モータの設計と製作	59
4-5	専用タイヤ開発	66
4-5-1	タイヤ開発	66
4-5-2	結果	68
4-6	走行試験	69
4-7	まとめ	71
第5章	ニッケル系一次電池(オキシライド乾電池)を動力源とした目標時速 100kmの小型電気自動車用電源の最適化	73
5-1	はじめに	73
5-2	オキシライド乾電池の目標性能	75
5-2-1	オキシライド乾電池搭載本数の最適化	75
5-2-2	必要な電力量	76
5-2-3	電池特性確認と電源システム	78

5-3	実験	78
5-3-1	オキシライド乾電池放電特性確認の手順	78
5-3-2	衝撃試験	83
5-3-3	電源ユニットの設計	83
5-4	走行試験	85
5-4-1	走行テスト	85
5-4-2	速度記録	87
5-4-3	電池温度と内部抵抗	88
5-5	まとめ	89
第6章	電気自動車における速度変化特性と使用電力との関係	91
6-1	概説	91
6-2	EVにおける加速度を与える式の導出	91
6-3	必要電力	93
6-4	時間変化する駆動連力から速度プロファイルを得る方法	95
6-4-1	K, Ke, r の決定	95
6-4-1-1	モータ抵抗 r の導出	95
6-4-1-2	K の導出	96
6-4-2	投入電力から速度プロファイルを得る計算の例	96
6-5	結言	97
第7章	総括ならびに結論	99
謝辞		102
参考文献		103

第1章 緒言

1-1 電気自動車の歴史と電気自動車を取り巻く社会環境

人類は1973年と1978年に、二度の世界的オイルショックを経験した。その頃は採掘可能な石油資源は残り40年と予測され、それを契機に世界中で省エネルギーに関する議論が本格化した。日本の産業界もエネルギーの有効利用の必然性から、省エネルギー性の追求に目が向けられ、エネルギー変換効率の向上、原材料の節約などが社会的に大きな目標となった。

最近では採掘が多少困難な場所でも天然資源採掘の技術開発が進み、天然資源枯渇が大声で叫ばれることは少なくなった。とは言え、オイルサンドやオイルシェールまで石油資源として利用されつつありいつかは枯渇する。またバイオ燃料にも注目が集まり、一時的にせよ需要と供給のバランスが壊れつつある。将来必ず枯渇する石油資源を無駄にせず、未来により多く残すため、自動車の走行エネルギーなど代替エネルギーでまかなえるものの推進を、積極的に推し進める機運が高まってきたといえる。

そのためガソリンエンジン自動車など可能なものから、積極的に電気自動車などの代替エネルギー車に変えていくことにより、気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書でも示された、地球温暖化の原因とされるCO₂排出量の削減が進み、大気汚染を減らし地球温暖化傾向を減速させることにもなる。

自動車は19世紀の末に発明されその後瞬く間に世界中に広まった。その自動車の量産の開始・普及からは100年も経っていない。

この便利な自動車の歴史の中で、最初に登場したのはガソリンエンジン搭載の内燃機関自動車ではなく、電気モータを搭載した電気自動車であった。また地上の乗物として最初に時速100km/hを達成したのもガソリンエンジン自動車ではなく、電気モータ搭載の電気自動車ジャメス・コンタント号だった。日本における電気自動車製造も1911年からである。

電気自動車の量産開始がガソリン自動車より早かったのは、構造が単純で量産に適したことと、初期のガソリンエンジン自動車のような複雑な操作を必要とせず、女性にも運転できたからである。しかし直ぐに量産車の地位をガソリンエンジン車に明け渡し、1920年代に電気自動車が姿を消したのは、性能面で敗れた訳ではなくエネルギー源となる電池容量が少ないため航続距離が短く、また充電時間が長かったためと言われている。

日本では、1960年代に入り大気汚染を防ごうとの社会的動きで電気自動車の研究が始ま

った。しかし電気自動車は価格が高く、性能面でガソリン自動車に及ばないため普及には至らなかった。1988年にフロンガスやCO₂排出の地球環境問題から、電気自動車の研究が再び注目を集めるようになった。[清水(1992)、佐藤、高(2002)、Water Planet Tomorrows (2007)]

ガソリンエンジン自動車は最近様々な機能が増え一層便利で豪華になってきた。しかしながら天然資源枯渇は避けられない事実であり、地球温暖化防止対策のためにも高燃費でクリーンな自動車が求められる。そこで、代替エネルギーの利用や直接排気ガスを出さない地球温暖化対策における電気自動車の優位性を生かし、電気自動車を社会に受け入れてもらうためには、エネルギー源となる電池容量の少なさや充電時間の短縮が必要といわれている。

そのような現状の改善に資するべく、著者は電気自動車にかかわる本研究をすすめた。

1-2 省エネカーに関する研究

1-2-1 省エネカーによる燃費競技

二度にわたる世界規模のオイルショックを乗り越え、社会がやっと落ち着きを取り戻しつつあった1981年、日本でも自動車産業に関連する二つの組織により、省エネルギー性能を競う燃費競技(以下エコラン)が、続けて開催されるようになった。「エネルギーの有効利用」「未来の子供達に夢を」などをテーマに、ガソリンエネルギーによる省エネ競技自動車(以下ガソリンエコカー)を集め、ガソリン1リットル換算で何km走行できるかの燃費性能を追及する開発研究の技術力を競う、省エネルギー競技(以下ガソリンエコラン)が開催されるようになった[Max Press(1980)、シェル石油、CAR GRAPHIC(1981)、本田技研工業(1981)]。

一方、電気エネルギーで走る省エネ競技自動車(以下EVエコカー)による省エネルギー競技(以下EVエコラン)の開催が1995年より始まり、現在各地で開催されている。このEVエコランの主な競技方法は、支給されるイコールコンディションに保たれた小型バッテリーの合計144WHのエネルギーを使い、2時間で如何に長い距離を走行できるかを競う競技である。このEVエコランの場合もガソリンエコランと同じく、モータやコントローラの最適化や高効率化の追求、省エネ性に優れた車体の開発とエネルギーマネジメント技術の確立が重要であり、このような技術革新が一般に使用される自動車の省エネ性能向上

に貢献するといえる。

1-2-2 省エネカーの性能向上に関する研究

著者は、1981年ガソリンエコランへの参加を念頭にガソリンエコカーの研究・製作に着手した。ガソリンエコカーやEVエコカーの燃費性能向上に重要なのは、動力源であるガソリンエンジンの高効率化や、電気モータおよびコントローラの性能向上が第一に挙げられることが多いが、自動車の燃費性能向上とはそれだけでなく、更に重要な要素は車輛の走行性能の向上と軽量化の追及に加え、位置エネルギーの有効利用である。車輛を構成する全ての要素が自動車の性能および燃費性能に影響するのは言うまでもないが実は、それら一つ一つが最適と思われるものを組み合わせた場合でも、各部位やシステム間での相性によって複合的結果としての燃費性能がベストになるとは限らない。

著者はガソリンと電気の両エコカーに共通する課題として、ガソリンエンジンの効率化の追求、電気モータなどの効率向上とともに、車輛の走行性能の向上には各種走行抵抗の低減、操縦性の良さ、運動性能・回頭性の良さなどに関する研究を重点的におこなった。また車体の軽量化には軽量で高剛性のCFRPやアラミッド繊維などの新素材を使用した。

この走行性能の向上に関する研究内容のうち「操舵装置」については、第2章の前半で述べる。位置エネルギーの効率的利用としては、回生制動の実用性を研究した。この位置エネルギーの効率的利用に関する「電動車の回生システムの開発」については、第2章の後半部で述べる。

1-3 レンジエクステンダー (RXT) 電気自動車システムの実用性能に関する研究

1-3-1 けん引用電気自動車の開発

天然資源・化石燃料の枯渇などの問題に対応するためには、現在普及しているエンジン自動車に替わる移動手段が必要になってくる。その代替候補の一つとして期待される電気自動車の普及の妨げとなっている問題の一つである航続距離の短さを解決する方法として、けん引式発電機による、レンジエクステンダー (RXT) システムを考えた。そのシステムを完成させるため、けん引用電気自動車および被けん引式発電車の研究・開発をおこなった。

レンジエクステンダー (RXT) システム研究のため製作した、けん引用電気自動車は、ガソリンエンジン自動車の内燃機関およびその補機類の代わりに電気モータ、モータコントローラ、バッテリー、電源装置、バッテリー充電器などを組み込んだもので、性能評価のため車検を取得し一般公道を走れるようにした。

この研究内容については、第3章の前半部で述べる。

1-3-2 被けん引式発電車 (レンジエクステンダー : RXT) に関する研究

電気自動車の普及の妨げとなっている最大要素の一つに、航続距離の短さがあげられる。その欠点を克服するために、高性能で安価なバッテリーの開発や、電源供給のインフラ整備が進むまでの措置として、電気自動車が発電機を搭載したトレーラをけん引しながら長距離走行を可能とする、レンジエクステンダー (RXT) システムを製作した。

筆者はこのレンジエクステンダー (RXT) システムの有効性を検証するため実際にけん引用電気自動車と被けん引式発電車によるレンジエクステンダー (RXT) システムを製作し、合計 3000km 以上の長距離テストを実施した。

本研究で開発した、けん引式発電車は電気自動車の電源としてだけでなく、機動性の高い電源車として他の用途にも利用できることを検討する。

このレンジエクステンダー (RXT) システムの研究内容については、第3章の後半部で述べる。

1-4 乾電池を動力源とする高速走行を目指した小型電気自動車の研究

1-4-1 ニッケル系一次電池を動力源とした目標時速 100km の小型電気自動車の動力設計

電気自動車が高効率で走行できる乗物であることをアピールするために、市販のオキシライド乾電池[®]を用いて人が乗り、時速 100km で走行することが可能であることを実証する研究を行った。それまでの EV エコカーや電気自動車と異なり、高速走行に挑戦するには小型電気自動車としての総合抵抗の低減と、走行安定性や安全性が要求される。

開発した車体、駆動系、タイヤなど動力システムの研究内容に関しては、第4章で述べる。

1-4-2 ニッケル系一次電池を動力源とした目標時速 100km の小型電気自動車用電源の最適化設計

乾電池を動力源にして高速走行をおこなうには、その動力源のオキシライド乾電池[®]の特性を把握し、乾電池の持つエネルギーを短時間で効率よく取り出すシステムの設計が要求される。その目的を達成するため、乾電池による電源システムの最適化について研究した。

電源であるオキシライド乾電池[®]に関する電源系の研究内容に関しては、第 5 章で述べる。

1-5 電気自動車における速度変化特性と使用電力との関係

自動車の性能評価において最も関心の高い加速、減速特性を予測する一般式を導き出した。

その式を第 4 章・第 5 章の研究で得られたデータに適用し、実際走行した場合の速度プロファイルが使用した電力の変動とが、ほぼ正確に一致することを確認した。この研究の詳細に関しては、第 6 章で述べる。

第2章 省エネカーの性能向上に関する研究

2-1 はじめに

本章では電気自動車のみならず、小型自動車全般において省エネルギー効果を発揮できることを目指して開発したリーン操舵装置、および電気自動車の運動エネルギーの効率よい回生装置の研究結果について述べる。

省エネカーによる燃費性能を競う競技（以下エコラン）の歴史は、第二次大戦の前アメリカのシェル研究所で普通の自動車を使って始まりその時1位の車は17.7km/lであった。その後も競技は続けられ10年後の記録は53.1km/lに伸びた。1960年代には量産車の基本形態を保ったまま132.8km/lにまで記録が伸びた。1973年になって燃費競技専用車による現在のエコカーのスペシャルクラスが創設された。その年1位の記録は159.3km/lであった。シェルがこの競技を社外にも公開したのが1977年でその4年後、日本でも開催されるようになり、その1981年からエコカーに関する研究を開始した[Max Press(1980)、シェル石油、CAR GRAPHIC(1981)]。

本章では、省エネカーのコーナーリング時の走行抵抗の低減に関する研究、およびEVエコカーの回生システムの研究について示し、ガソリンエコカーおよびEVエコカーに適用した結果について述べる。

2-2 車輛の走行抵抗

ガソリンエコランおよびEVエコランの省エネカーに共通する課題は、車両の走行性能を高めることである。改善には車の走行時に働く各種抵抗の低減が重要な要素となる。各種抵抗には〔転がり抵抗〕、〔空気抵抗〕、〔加速抵抗〕、〔勾配抵抗〕がありこれら4つの抵抗を合わせたものが〔全走行抵抗〕である。著者はそれら各抵抗の低減を目ざして、1981年から研究をおこなった。

まず、これら各種抵抗の概要を説明する。

1. 転がり抵抗： 転がり抵抗とは自動車の走行に用いるタイヤ周りで発生する抵抗で、次の式で表される。

$$\text{転がり抵抗 } R_r \text{ [N]} = \text{転がり抵抗係数 } \mu_r \times \text{車両総重量 } W \text{ [N]}$$

このタイヤ周りで発生する抵抗の低減には、転がり抵抗の少ないタイヤ、軽く回る車軸、タイヤに掛かる重量の低減などがある。タイヤの接地幅を広げることはタイヤ外周上の接地長さを小さくできるため、タイヤ回転中の変形量が少なくなりタイヤの転がり抵抗低減に効果がある。タイヤの内圧を高めても同様の効果があるが、無闇に高くするのは破裂・バーストなどの危険性が上昇する。

2. 空気抵抗： 空気抵抗とは自動車が行走するとき、周りの空気をかき分けながら進むため、それを押し戻そうとする空気の力が空気抵抗で、次の式の表され空気抵抗は速度の二乗に比例する。

$$\begin{aligned} \text{空気抵抗 } R_a \text{ [N]} &= \text{空気密度 } \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \times \text{空気抵抗係数 } \lambda \\ &\times \text{車両前面投影面積 } S \text{ [m}^2\text{]} \times \text{走行速度 } v^2 \text{ [m/s]} / 2 \end{aligned}$$

この空気抵抗の低減には、車体表面のスムーズな空気の流れの調整、前面投影面積の縮小がある。降坂の場合同じ重量なら、空気抵抗の小さ方が降坂速度が早くなり、位置エネルギーを有効に利用できる。

3. 加速抵抗： 加速抵抗とは自動車が行走するときに発生する抵抗で、回転部相当重量はタイヤやモーターロータなど回転部の慣性質量による加速抵抗を重量に換算したものである。他の走行抵抗と異なり自動車を運転する人の技量にも大きく影響を受ける。加速抵抗は次の式で表される。

$$\text{加速抵抗 } R_c \text{ [N]} = \text{加速度 } b \text{ [m/s}^2\text{]} (\text{車両総重量 } W \text{ [N]} + \text{回転部相当重量 } \Delta W \text{ [N]})$$

加速抵抗を小さく押さえるには、軽量な車体、回転部分の軽量化、優れた旋回性能が重要であるが、車両総重量の軽量化が最も重要な要素である。

旋回性能の向上を図ったリーン機構を備える操舵装置は、スムーズなコーナーリングにより、コーナーリング中のスピード低下を抑えることで、旋回によるエネルギーロスを少なくするシステムであり、加速抵抗の低減となる。

4. 勾配抵抗： 勾配抵抗とは自動車の登坂の際に発生する抵抗で、車両総重量と勾配の角度に比例して増加する。勾配抵抗は次の式で表される。

勾配抵抗 R_e [N] = 車両総重量 W [N] 勾配 $\sin\theta$ [°]

登坂の場合は軽量な車体が最も重要である。

2-3 操舵装置の研究

車輛の走行抵抗を低減する手段として旋回性能が一つの重要な要素である。2 輪車と違い一般的な 3 輪・4 輪車はハンドル操作で操舵輪の向きを変えて旋回する。操舵輪は直進から旋回のためタイヤの向きを変えた角度差分の抵抗が増加し燃費にも影響する。また自転車タイヤやバイク用のタイヤは、車体をリーンして傾けることでも旋回力が生じる。この利点を 3 輪・4 輪車に生かすためリーン旋回システムを考案した。この節では、この操舵装置の研究について述べる。[芦田(1994)、芦田(1995)、増原(1989)]

2-3-1 開発した操舵装置

1981 年、最初に試作したリーン操舵システムは、ハンドルの一操作により操舵輪のリーン、およびステアの両方を同時に操作する機械式システムである。ラック&ピニオンのラックギア先端にダブルウィッシュボーンのアームを付け、ハンドルを回すと同軸のピニオンギアがラックギアを旋回方向に押しリーンする仕組みである。このシステムでのリーンは操舵輪に限られ、駆動輪やその他の従輪はリーンしない。Fig.2-1 はそのリーン操舵システムの動作図、Fig.2-2 はその機構を備えたリーン操舵システム 1 号車の写真である。

1991 年、水平軸と垂直軸を一つのハンドルに備えたリーン・ステア機構を開発。それまでアッカーマン方式のステア機構の省エネカーの車両に取り付けた。このリーン機構の方式は、リーン・ステア機構の操作により操舵輪だけでなく、車体および前後輪がリーンする。この車両をリーン操舵システム 2 号車とした。Fig.2-3 はリーン操舵システム 2 号車のリーン動作図である。システムの完成後、リーン操舵システム 2 号車でその有効性を確認したのち、特許申請をおこなった。

1992 年、リーン操舵システムの熟成用に、車体から新設計でリーン・ステア機構を備えたリーン操舵システム 3 号車を製作し公開した。

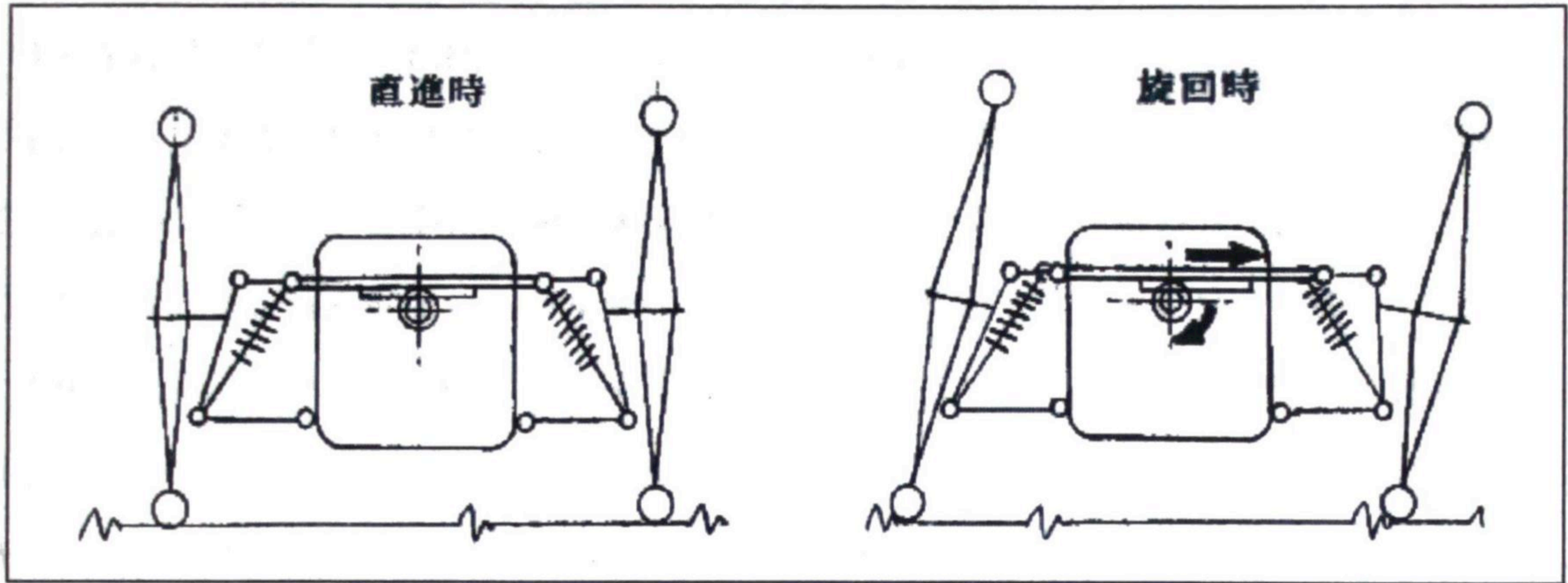


Fig. 2-1 リーン操舵システム1号車 リーン動作図 [芦田(1994)]



Fig. 2-2 リーン操舵システム1号車の写真

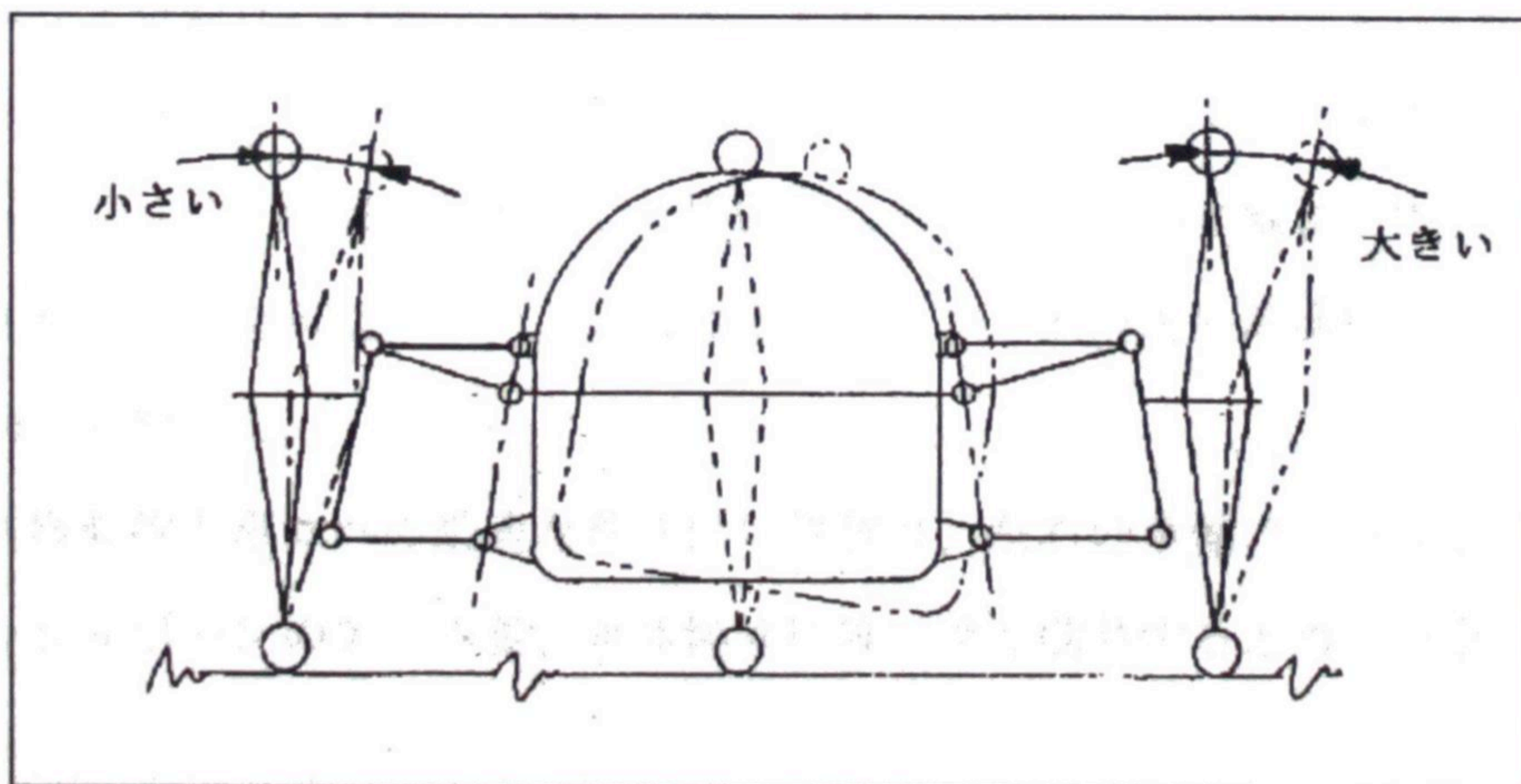


Fig. 2-3 リーン操舵システム2号車リーン動作図 [芦田(1994)]

2-3-2 操舵装置の機構と操舵の概要

特許を取得したリーン操舵システムは、左右の操舵輪を、ダブルウィッシュボーンの平行なアームで車体に取り付け、水平・垂直の二つの軸を持つハンドルと、直進時に車体を直立に保つスプリングを備える操舵機構である。ハンドルは操舵輪のリーンとステアを独立におこなえる。垂直軸のハンドル操作でリーン量を調整し、水平軸は一般的なステアリング操作をおこなう。高速時の旋回や低速時の大回りはリーンによって行い、低速時の小回りやリーン時の調整はハンドル操作でおこなう。リーンはドライバーの体重移動や垂直軸のハンドル操作でおこなう[芦田(1994)、芦田(1995)]。

右に旋回する場合、2輪車の様に回転内側へ体重を移動し、ハンドルの右側を手前に引き、ハンドルの左側を押すと、ハンドルの垂直軸回転で動作するリンク機構が右のダブルウィッシュボーンを押し上げ、左のダブルウィッシュボーンを引き下げる。その結果、車体は右に傾き、ダブルウィッシュボーンで繋がった左右の操舵輪も同時に右に傾き右旋回が始まる。その時、水平軸のハンドルのステア操作で旋回半径などのコントロールができる。その結果、走行抵抗の少ないスムーズな旋回ができる。旋回終了後は体重移動を元に戻し垂直軸のハンドルに加える力を弱めると、直立に保つスプリングの力が釣り合い車体も操舵輪も復元し直立する。Fig.2-4 はリーン模式図、Fig.2-5 は操舵機構背面図、Fig.2-6 は操舵機構平面図である。Fig.2-7 は実施例リーン操舵システム 2号車の写真である。Fig.2-8 はリーン操舵システム 3号車のリーンの様子を示す写真である。左右の操舵輪は CFRP 製モノコックの車体から、平行等長ダブルウィッシュボーンで支持し、操舵輪をリーンさせると車体もリーンする。

車輛が旋回する場合、内側の車輪と外側の車輪では回転半径が異なるため、左右の操舵輪のリーンする角度を最適化する必要がある。その解決策として、ダブルウィッシュボーンのアームの取り付け位置を割り出し、旋回時において外側の車輪より内側車輪をより多くリーンさせることを可能にした。これによりリーンする角度の最適化をおこない、スムーズな旋回を実現した。

この左右操舵輪の車体への最適な取り付け位置は、左右の車輪のトレッド寸法およびダブルウィッシュボーンのアーム長、車体幅寸法等と深く関連するため、一定ではない。

Fig. 2-6 操舵機構平面図 [芦田(1995)]

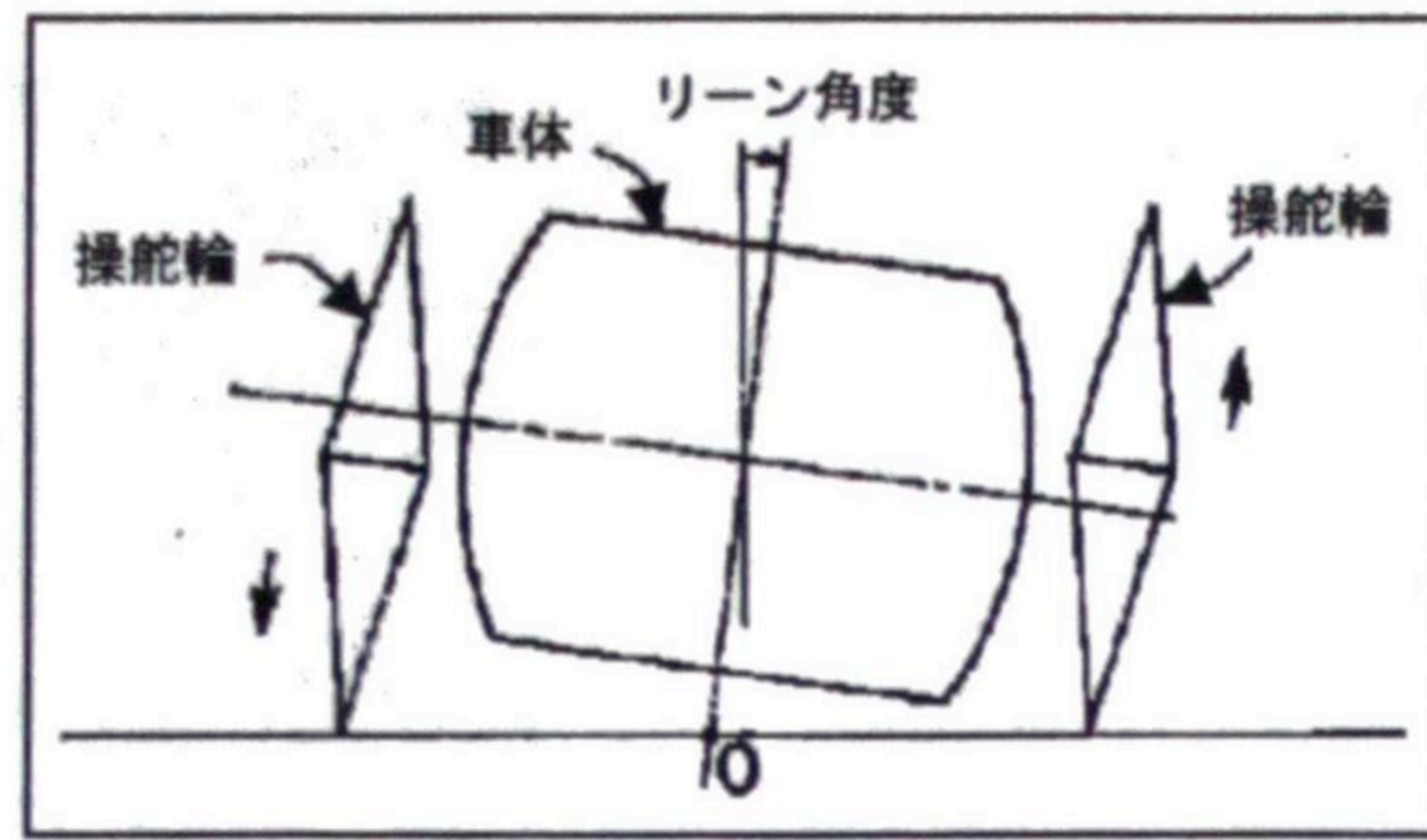


Fig. 2-4 リーン模式図 [芦田(1995)]

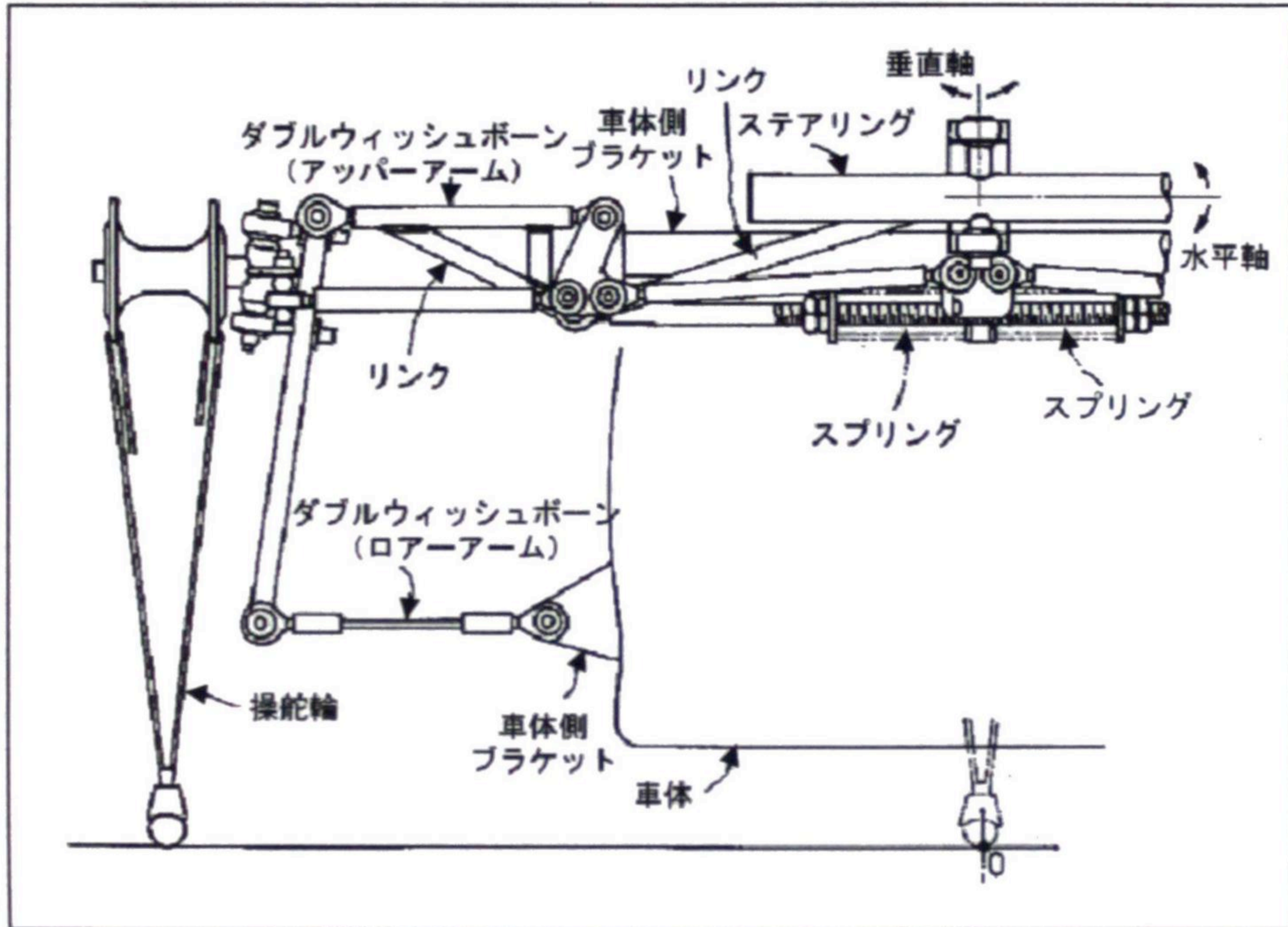


Fig. 2-5 操舵機構背面図 [芦田(1995)]

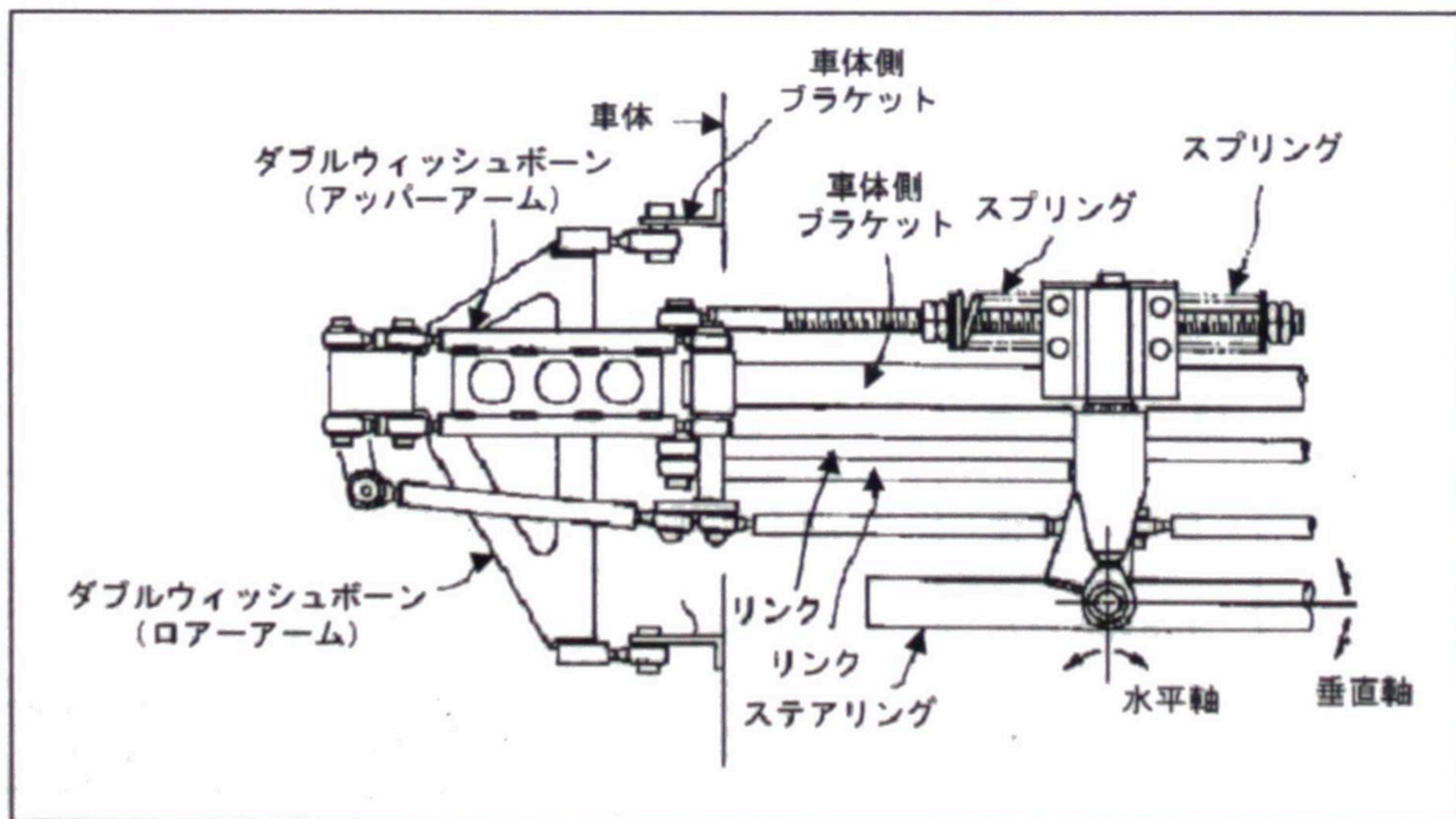


Fig. 2-6 操舵機構平面図 [芦田(1995)]

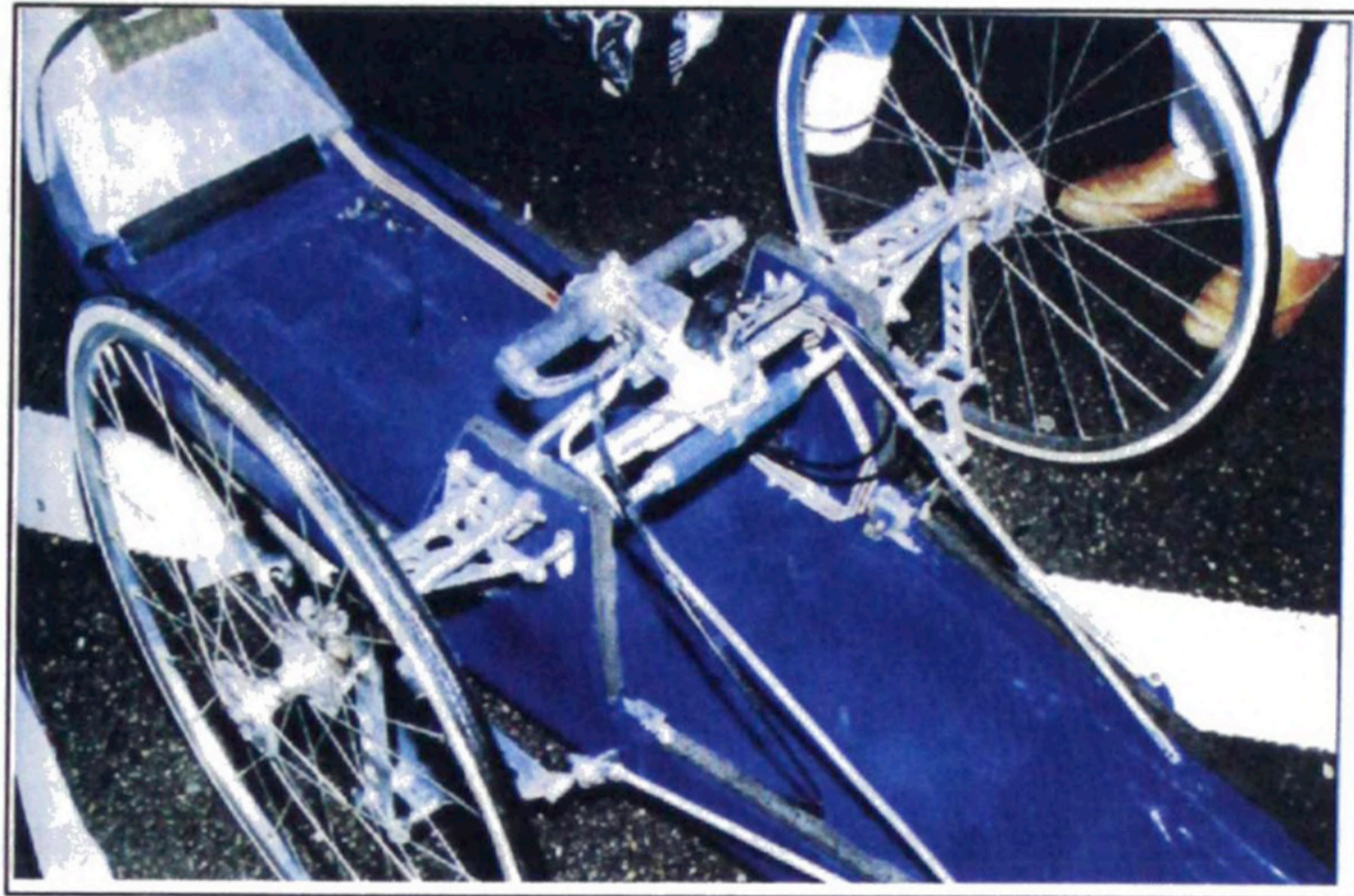


Fig. 2-7 リーンシステム実施例 リーン操舵システム 2号[熊野(1992)]

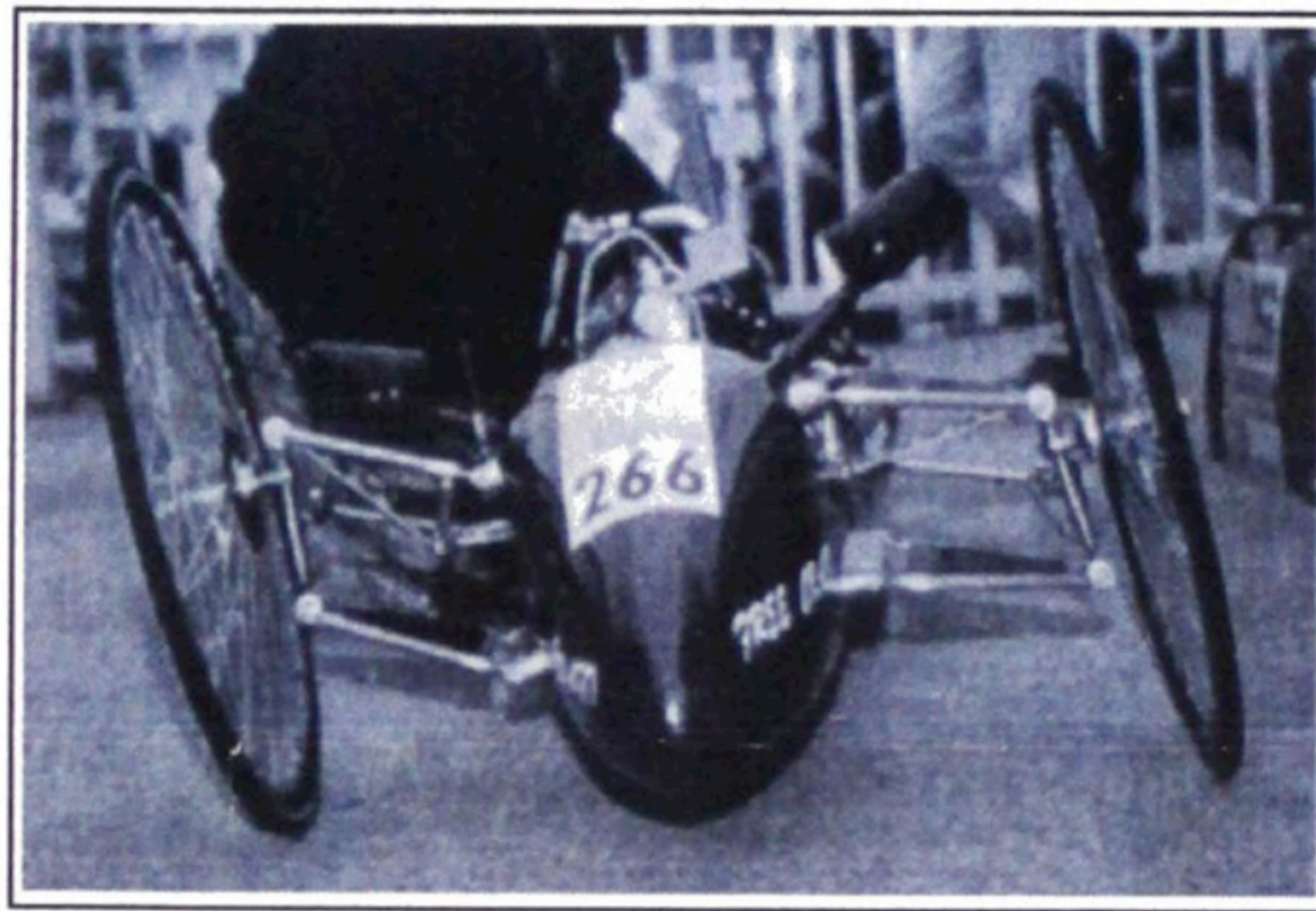


Fig. 2-8 リーン操舵システム 3号車 リーンの様子[CG (1993)]

2-3-3 操舵装置の有効性

この操舵装置の有効性を確認するため、同一の車体およびエンジンのガソリンエコカー6号車とリーン操舵システム2号車の燃費を比較する (Table 2-1)。このデータから、リーン操舵システムは加速抵抗の低減において有効であることが確かめられた。

Table 2-1 リーン操舵システム (有・無) 燃費比較

車種	計測 1 回目	計測 2 回目	計測 3 回目	平均燃費
ガソリンエコカー 6号車	392.28km/l	264.0km/l	422.54km/l	359.60km/l
リーン操舵システム 2号車	238.1km/l	565.31km/l	—	401.705km/l
対比	—	—	—	+11.7%

2-4 電動車の回生システムの研究

電動車の燃費向上の手段として回生制動が広く知られている。架線で繋がった電車の場合、回生制動による発電で減速中の車輌から回収した電気エネルギーを、架線を使って他の車輌で消費するため非常に経済的なシステムである。電気自動車の場合、回生制動ではエネルギー源のバッテリーに蓄えるのが一般的手法であるが、減速などの短時間の急速充電ではバッテリーの温度上昇だけに費やされ、鉛蓄電池の場合、短い時間ではほとんど充電されない。

そこで、回生制動で発電した電気を有効に利用する方法として、バッテリーとキャパシタ（コンデンサ）を搭載し、回生制動時は急速充電に向くキャパシタを接続して蓄え、その電力をバッテリーより優先して利用する方法を考案した。キャパシタとバッテリーの電圧を比較しバッテリー電圧より高い場合、発進や加速をキャパシタの電力でおこない、キャパシタ電圧がバッテリー電圧より低くなった時キャパシタを切り離す制御システムを考案した。この節では、この回生システムの内容について述べる。[芦田(1998)、日野自動車(1992)、富士重工(1997)]

2-4-1 回生システムの概要

装置は Fig.2-9 に示すように、駆動用モータと電源バッテリーと回生用キャパシタ、およびそれを切り替えるスイッチング機構とそれを制御する制御部で構成されている。

電源バッテリーのエネルギーで走行中、減速のために回生制動で発電する時、制御部がスイッチング機構を制御し、急速充電に適するキャパシタに接続を切り替え、キャパシタに充電する。その時キャパシタ電圧が規定電圧に達した場合は制御部がスイッチング機構を制御しバッテリーに接続を替える。発進時や再加速の時、制御部がバッテリーとキャパシタの電圧を比較して電圧の高い方を選択し、その時キャパシタ電圧が高い場合はキャパシタから出力するよう、スイッチング機構を制御してモータ電源に接続する。その後キャパシタ電圧がバッテリー電圧より下がれば制御部がスイッチング機構を制御してバッテリー出力に切り替える。

このシステムはキャパシタとバッテリーの特性にあった充放電を制御するスイッチング回路を備えている。Fig.2-10 はスイッチング切替部構成の模式図である。Fig.2-11 は試験車に回生システムを搭載した写真である。

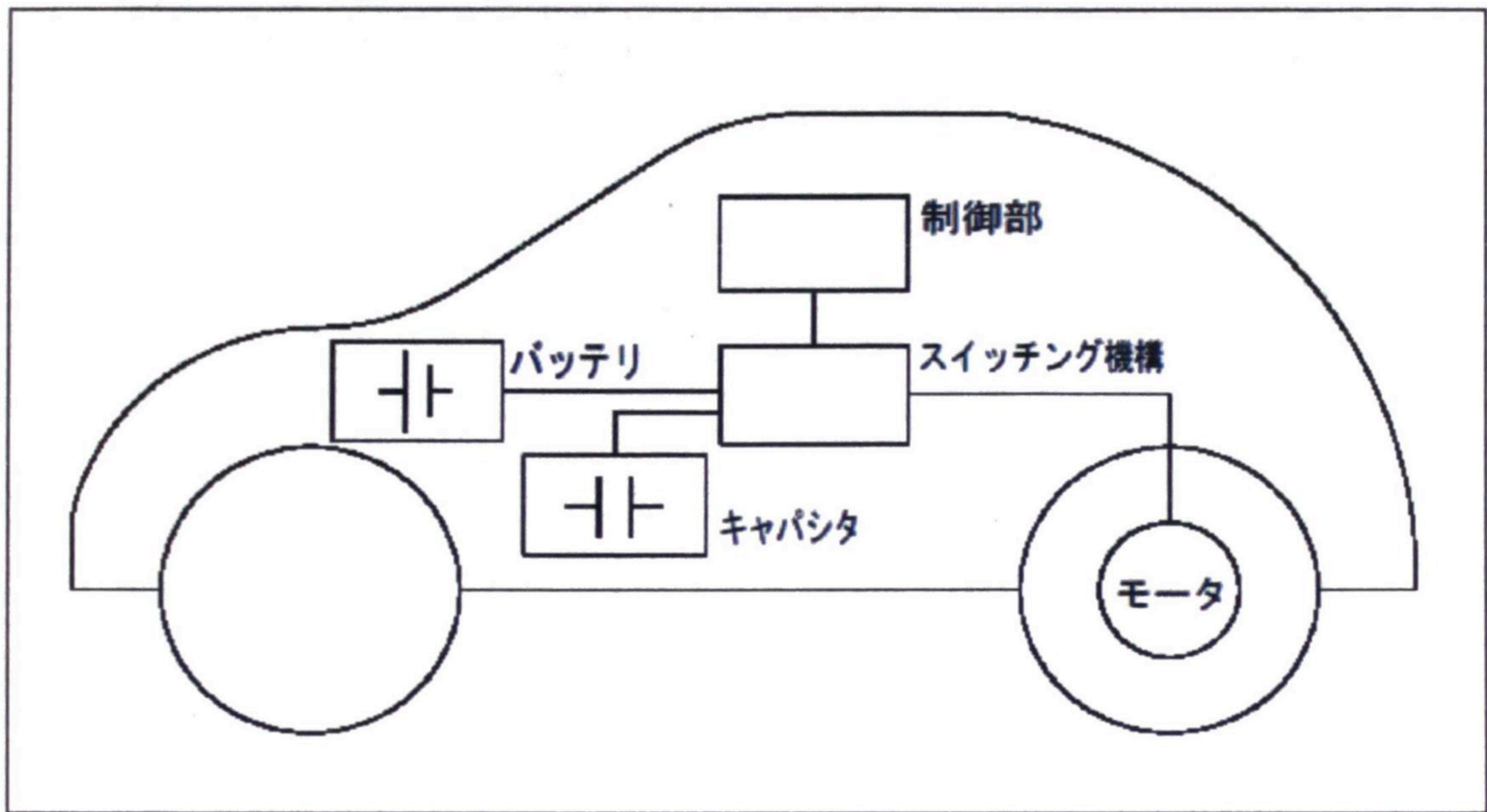


Fig. 2-9 電動車のシステム例

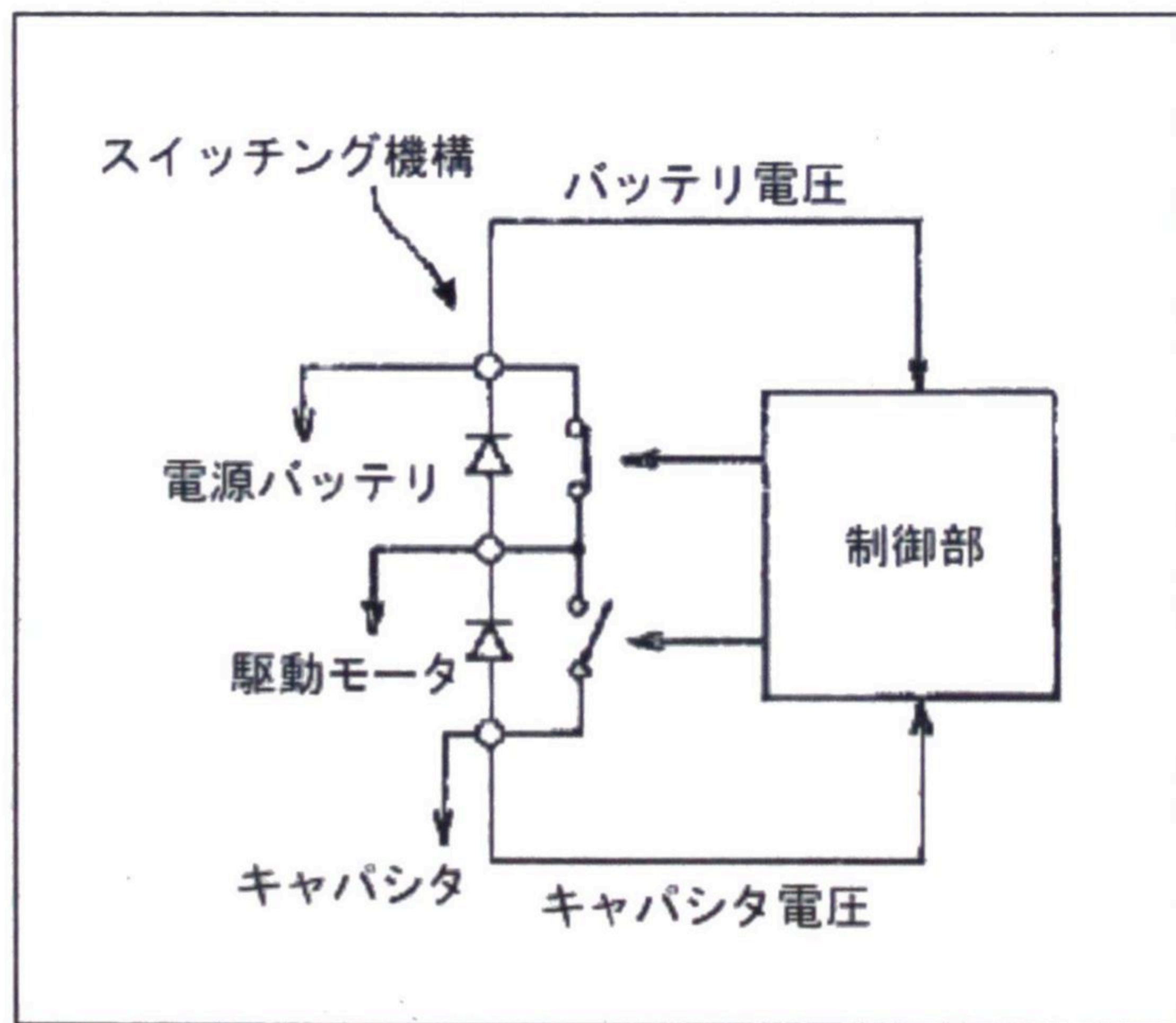


Fig. 2-10 スイッチング切替部構成の模式図 [芦田(1998)]

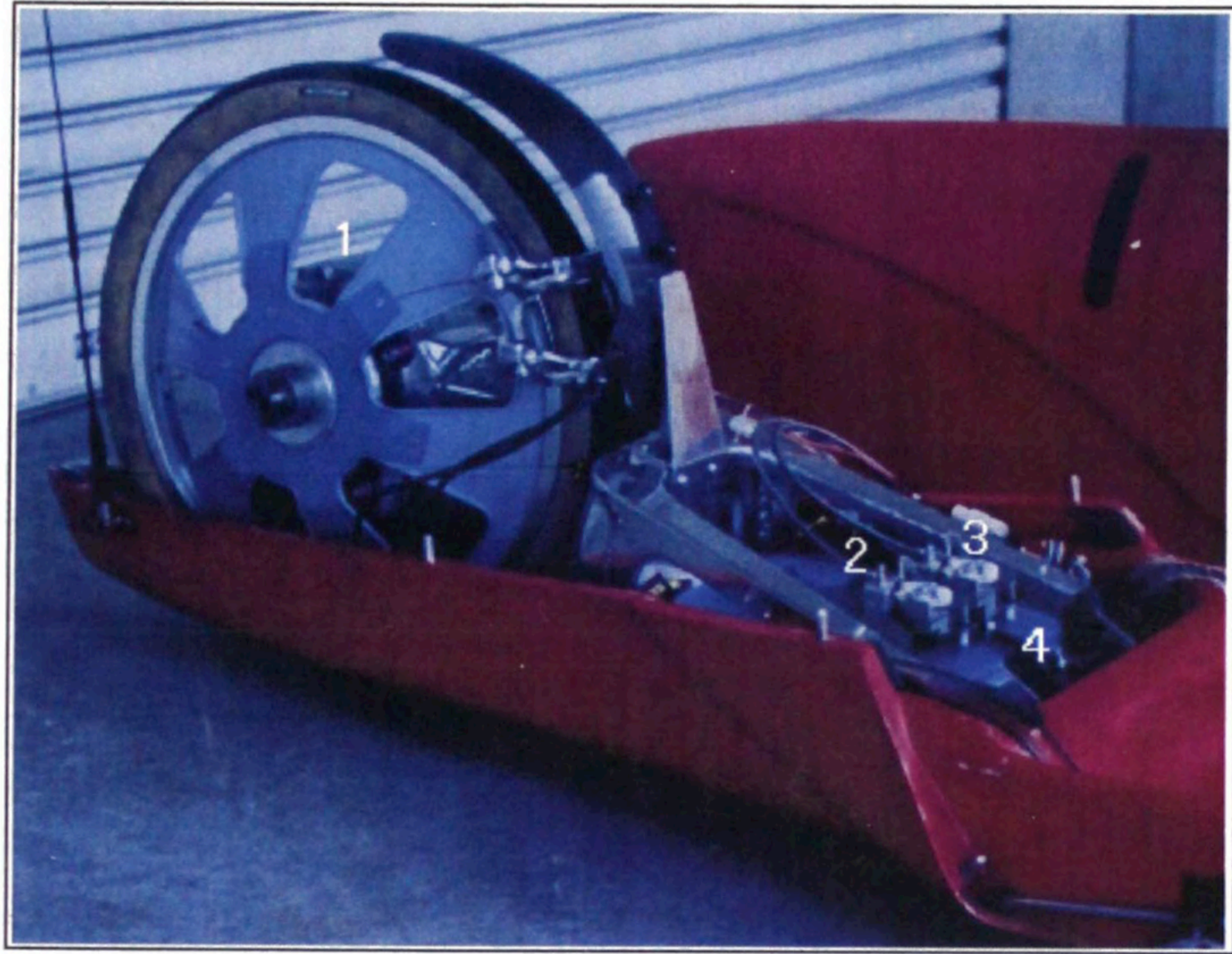


Fig. 2-11 試験車に搭載した回生システム

Fig.2-11 において①は D-D モータ、②はアクセル用ボリューム（ワイヤー操作）、③は回生用ボリューム（ワイヤー操作）、④の青いボックス内には制御部およびスイッチング機構を内臓、重量配分とスペースの関係でバッテリーおよびキャパシタは車体の前部に搭載した。

2-4-2 回生システムの有効性の確認

回生システムの有効性を確認するため、下り坂と上り坂がほぼ同じ角度で続く坂道において実験をおこなった。下り坂からの惰性で登り坂を登る距離と、下り坂を降りながら回生制動による発電でキャパシタに電力を蓄え、低速の惰性で坂を登った後キャパシタの電力で坂を登る距離を比較し効果を確認した。

Fig.2-12 は試験した坂道の略図である。

Table 2-2 は登坂距離を比較した結果である。①は 4 度勾配の下り坂に時速 40km/h で進入、回生ブレーキで時速 30km/h に保ちながら降坂、続く登り坂をキャパシタに貯めたエネルギーで初期に加速した場合である。②は①同様時速 40km/h で下り坂に進入し回生せず惰性で坂を下り、続く登り坂を何処まで上れるかを比較した場合である。その結果、本

回生システムでは惰性走行より約 50%低い速度にも拘らず、登坂距離が僅かに劣るだけであつた。このシステムが回生制動により回収した電力を蓄積し有効に利用できることを確認し、また安全な降坂速度以上の余分な位置エネルギーを回生ブレーキで回収することで、安全に走行するために有効なシステムのものであることが検証できた。

Fig.2-13 は試作車を使い試験走行中の写真である。

本来、この回生システムを有効に使用するには、下り坂を降りたのち平坦地を走りその後、登坂する場合であることはいうまでもない。登り下りの坂の多い道路においてこそ、この方式は電気自動車の電源バッテリーの消費を抑え燃費向上に大きな効果を発揮する。

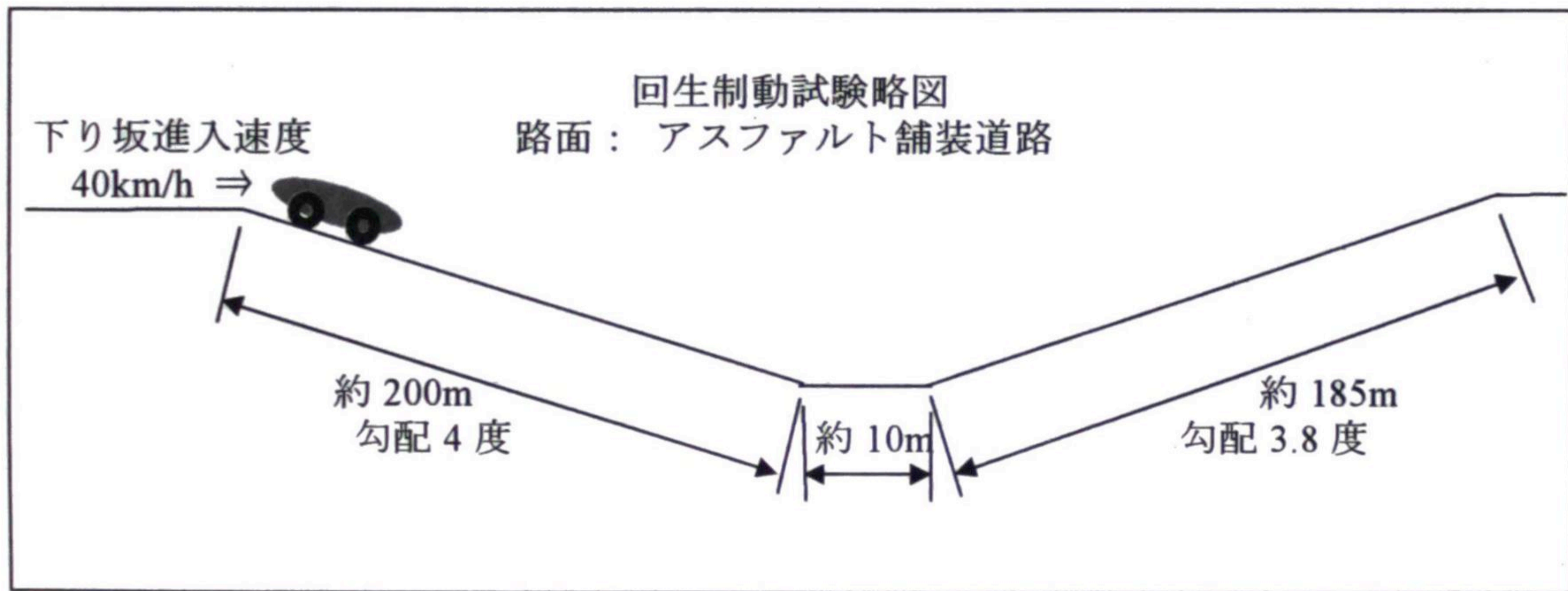


Fig. 2-12 回生制動試験坂路

Table 2-2 登坂距離比較（'96.8.20 2回実施の平均）

回生制動+キャパシタの有無	降坂速度	登坂距離
① 回生ブレーキ有効	約 30km/h	約 133m
② 回生ブレーキ無効	約 58km/h	約 140m



Fig. 2-13 試作車による回生システム動作確認の試験走行の写真

2-5 まとめ

本論文の第3節では、車両の加速抵抗を抑え、走行抵抗を低減する目的で研究した「操舵装置」について述べた。

本論文の第4節では、EVの燃費向上に資するため開発した「電動車の回生システム」について述べた。

著者の考案した「操舵装置」と「電動車の回生システム」は、走行抵抗の低減を目的に研究したものであり、何れも燃費が向上し省エネ効果があることがわかった。この研究により得られた技術は、マイクロカーと呼ばれる第一種原動機付3輪車・第一種原動機付4輪車や電動車椅子およびセニアカーなど、比較的小型車両の分野で広く応用し生かすことができ、小型自動車全般に応用できる。

第3章 レンジエクステンダー (RXT) 電気自動車システムの 実用性能に関する研究

3-1 電気自動車

電気自動車 (Pure EV) の普及を阻害している問題点は、ガソリンエンジン自動車における利便性を完全には享受できないことである。特にガソリンのインフラが整備され、どこにおいても燃料供給が可能であるため、ガソリンエンジン自動車は原理的に無限の航続距離を持っている。一方で現在の電気自動車用の充電ステーションはまだ十分に整備が進んでおらず、それが電気自動車普及を阻害する最大原因の1つとして掲げられる。新型バッテリーの開発や従来型バッテリーの性能向上の努力が日夜なされているが、バッテリーの充電時間の長さも電気自動車の普及を阻害している要因の一つである[清水(1992)]。そのため一充電走行距離の短い電気自動車での行動範囲は、電源を確保できる範囲を超える事ができない。Li-ion 電池などによる高容量化や急速充電システムなど様々なアプローチも研究されているが、充電施設のインフラ整備まで含めるといまだ解決の道筋が見えていない。この問題の一つの解決策として開発したのが、本研究のレンジエクステンダー (RXT) 電気自動車システムである。

筆者はこのレンジエクステンダー (RXT) システムの有効性を検証するため、実際に、けん引用電気自動車と被けん引式発電車によるレンジエクステンダー (RXT) システムを製作し、合計 3000km 以上の長距離テストを実施した。開発したけん引式発電車は電気自動車の電源としてだけでなく、機動性の高い電源車として他の用途にも利用できることを述べる。

3-1-1 研究の目的

本章で述べるレンジエクステンダー (RXT) システム開発の目的は、実際に車両を製作し、評価することによって、定量的にそのシステムの利点特徴を明らかにすることにある。

近年、ハイブリッド自動車 (以下 HEV) が普及し、トヨタ自動車だけでも 2007 年に 100 万台の販売を突破した。HEV は、そのエンジンを燃費・排ガス両面で最適な領域で使用し、

小限のガソリンで運転することを目指したものであるが、ガソリンをかなりの量を使用することには変わりはない。そこで最近、純粋なバッテリー電源だけで走る電気自動車(以下
である石油以外のエネルギーで走る特徴を生かしながら、EV の欠点である一充

距離の短さを克服するものとして、プラグインハイブリッド車(以下 PHEV)の概念されつつある。すなわち、PHEV では、普段の買い物等短距離の移動には、バッテリーだけで走行する EV と変わらない。しかし、PHEV には発電機ないし内燃機関のエンジンが搭載されており、ある設定したバッテリー充電量以下になれば、このエンジンを動かして移動することが出来る。この方法は、燃費の向上と石油資源使用の最小化を図ることが出来るエースとしての期待がなされ、幾つかのシミュレーションや実際 PHEV の試作走行がなされつつある[日渡(2006)]。

この一充電走行距離の短さの問題を解決するために EV、PHEV 以外のシステムとして考えられるのが、レンジエクステンダートレーラ(以下 RXT)である。RXT では、普段の短距離走行ではバッテリーだけを使う EV として走る。しかし長距離走行の必要な場合、発電の出来るトレーラを EV の後ろに牽引し、その走行によって EV、HEV、PHEV だけの車両には無い、実用性を獲得することが出来る方法である[御堀(1995)、Thomas (1997)、EVnut.com、(参照 2006-10)]。

しかしこれまで、RXT が EV あるいは PHEV に対し、どのようなシステム的な利点があるかについての定量的考察がなされたことがない。本章では、実際に車両を製作し、それによって、EV、PHEV、RXT も利点欠点を明らかにし、今後の省資源の車両開発に向けた指針を明らかにする。

なお、RXT に近いもう一つの方法として、発電機を積んだトレーラの代わりにエンジンで駆動される車両を被けん引車として、前のけん引車を後ろから押す「プッシャー」と称されるシステムが米国で考案されている[EV Maine.org、(参照 2006-10)]。この方法でも走行距離を長くする方法が考えられているが、日本の車両法では、この方式は無人運転のエンジン車両で駆動されるという点から、認可されることがむつかしく、その運転の安全性にも疑問がのこるので、ここでは検討課題とはせず紹介に止める。

本節では、このようなけん引式発電機型シリーズハイブリッドシステムのうち、けん引用電気自動車の製作について述べる。

3-1-2 車両の製作と性能評価の方法

本研究では、実際に車両を製作し、その走行性能を実測することにより、EV、PHEV、RXT が抱える性能についての従来の不確定な要素を取り除くことを定量的におこなう。そのために、電気自動車 (EV) を製作し、それに牽引する発電トレーラも製作し、RXT を

構成し、車両データを取得する。PHEVについては、EVのデータを使用し、仮に発電機をEVに搭載し、PHEVとして実走行を行ったとしてシミュレーションを行い、相互比較データを得る。

シミュレーションのために製作したEVの、車両性能パラメータを実測データから導出した。また走行速度パターンとしては、日本の10-15モードを採用、日々の走行パターンとしては、1週間のうち、6日間は20kmの走行を行い、1日だけは距離200kmを走るとして、実際の個人の自動車使用パターンを模擬するようにした。このような計算はEV、PHEV個々にはなされたことがあるが、RXTを含んだものとしては今まで行われたことがなく、その結果は新規性が高いものである。

3-2 RXTシステムの製作

本節では、この研究にとって必要な車両を製作した工程についての概略を述べる。最初に電池だけで走るEVについてのべ、次に発電トレーラの製作について述べ、これらの走行性能をEV、RXTの両方について取得する。

3-2-1 けん引用電気自動車の製作

本研究に用いた、けん引用電気自動車は、'95年式ホンダCIVICを元のベース車両とし、エンジンをモータに取り替えることで、けん引用電気自動車としたものである。ベース車両からエンジンや燃料タンク、ラジエタ、排気管などガソリン燃料で走るための装備を取り外し、前後軸重量を測定した。改造前の重量配分を基に電気自動車の主要部品および補記類の配置を決定し、それをもとに改造申請書を作成し近畿運輸局に提出。改造申請の許可を待って電気自動車へ改造をおこなった[運輸省(1996-a)、運輸省(1996-b)、芦田(1999)、Ashida.T. (2007)]。

Fig.3-1は、製作したけん引用電気自動車の主要機器配置図である。鉛酸バッテリー搭載による前後重量配分の関係から、後部座席定員を3名から2名にし、後部座席中央にも鉛酸バッテリーを搭載した。そのため乗車定員は改造前の5人から、改造後は乗車定員4人とした。Fig.3-2は、けん引用電気自動車に使用したSOLECTRIA製AC40誘導電動機と、同じくSOLECTRIA製AT1200デファレンシャルギアボックスの写真である。

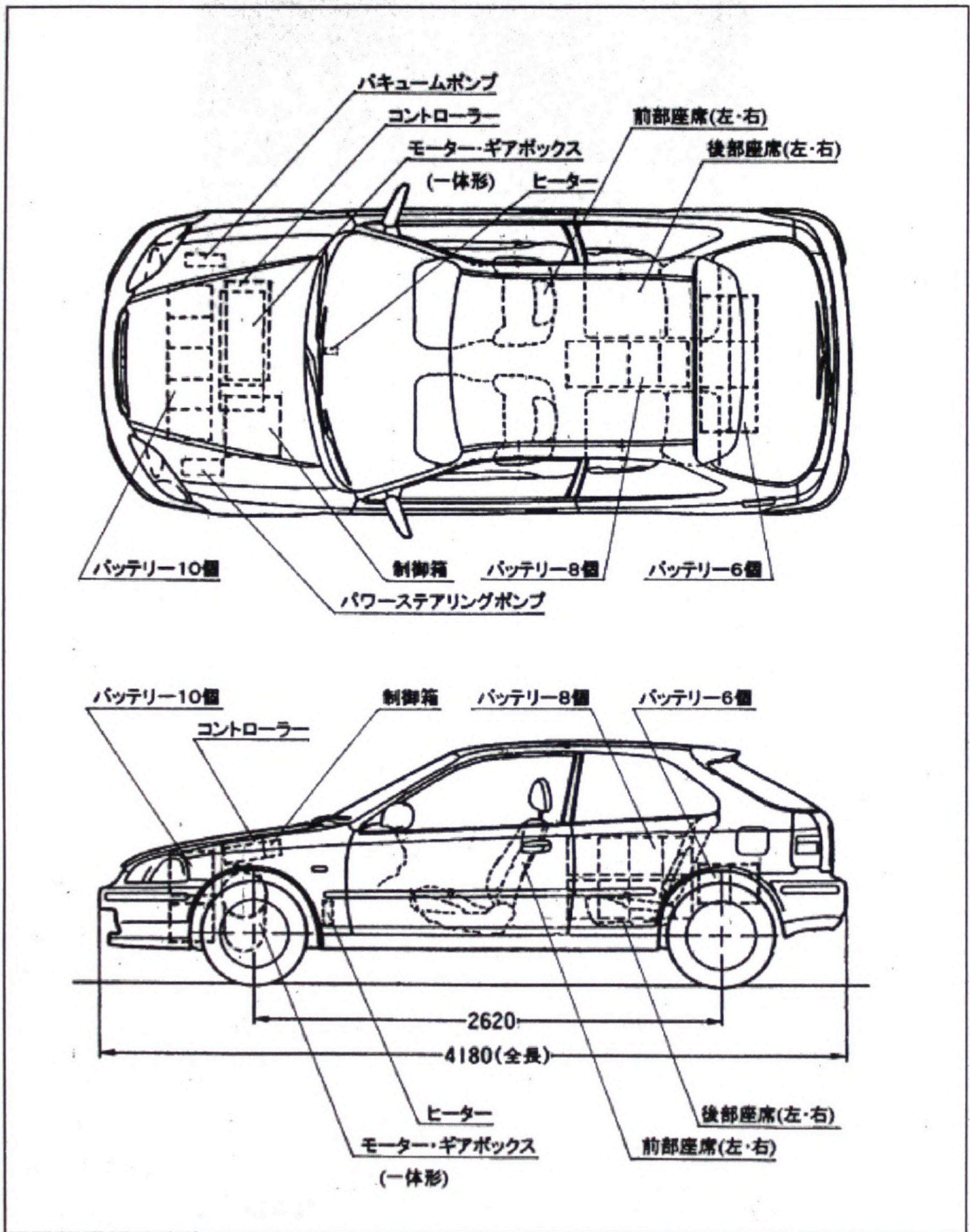


Fig.3-1 製作したけん引用電気自動車の主要機器配置図

ホイールベース	2620
全長	4180
回転半径	(10)

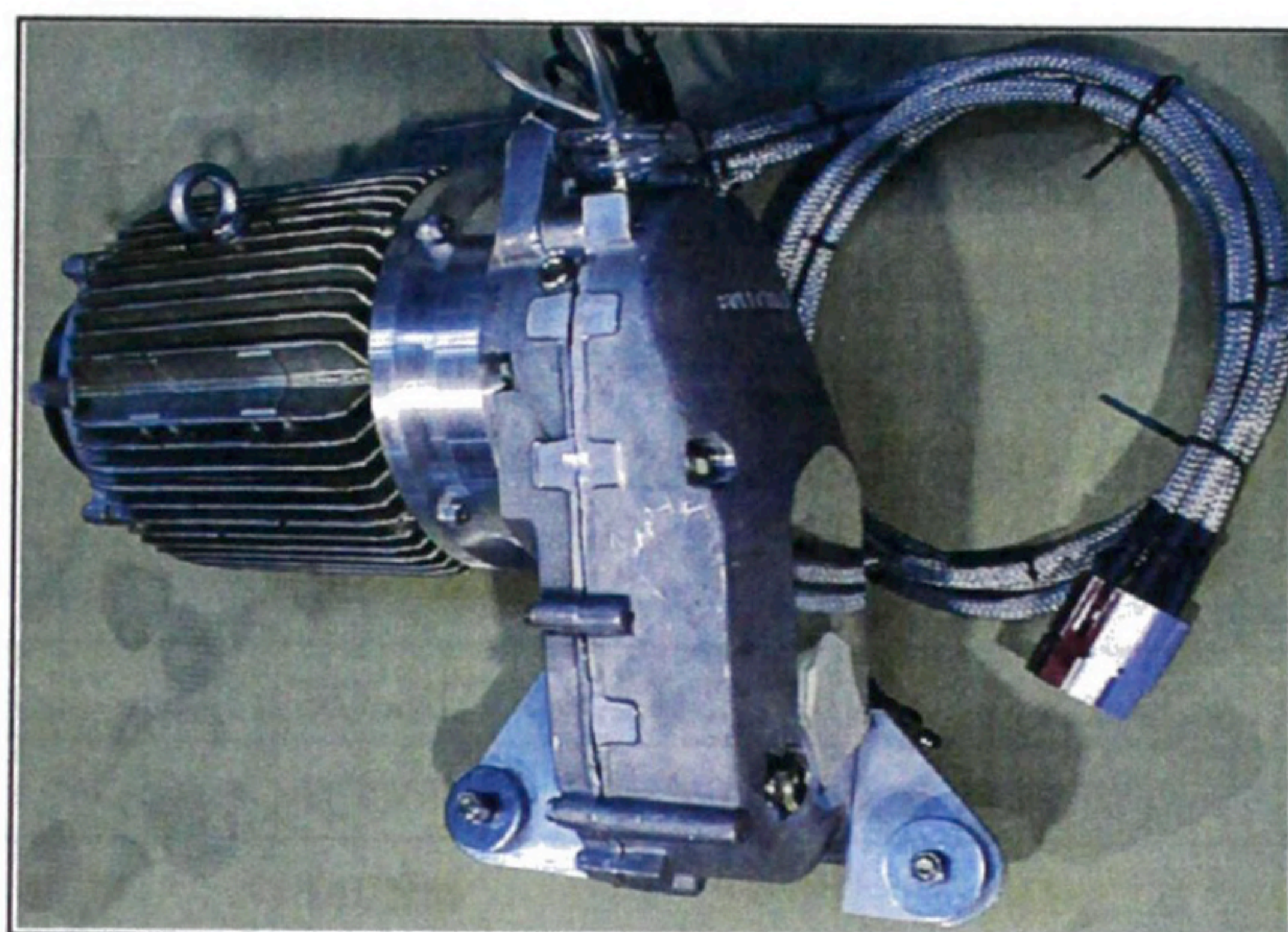


Fig.3-2 使用した SOLECTRIA 製 AC40 誘導電動機および
AT1200 デファレンシャルギアボックス

3-2-2 けん引用電気自動車主要諸元・性能

Table3-1 は、けん引用電気自動車へ改造前のホンダ CIVIC の主要諸元[ホンダ(1997)]とけん引用電気自動車へ改造後の主要諸元である。車輛総重量が 263kg 増加しているのはエネルギー源となる鉛酸バッテリー (52Ah 約 20kg) を 24 個、合計約 480kg 搭載したからである。

Table3-1 けん引用電気自動車の改造前・後の主要諸元

項目		ホンダ CIVIC ('95)	けん引用電気自動車
燃料の種類		ガソリン	電気
原動機型式		D15B	AC40
総排気量・出力 (ℓ・kW)		1.493	67kW
長さ	(m)	4.180	←
幅	(m)	1.695	←
高さ	(m)	1.375	←
軸距	(m)	2.620	←
乗車定員	(人)	5	4
車輛総重量 (kg)	前車軸重	740	878
	後車軸重	535	660
	計	1275	1538
タイヤサイズ		175/70R13 82S	←
回転半径	(m)	5	←

Table3-2 は完成したけん引用電気自動車の装備・仕様である [SOLECTRIA (1997)、豊田工機(1996)、ダイハツ(1997)、芦田(2007-b)]。

Table3-2 けん引用電気自動車 装備・仕様

装備・項目	仕 様
モータ	SOLECTRIA 製 三相インダクションモータ
モータ出力	定格 18kw、最大 67kw(DC 288V 時)
最大トルク	140Nm
回転数	0~12000RPM (後退時 0~3000RPM)
モータ効率	90%以上
コントローラ	SOLECTRIA 製 UMOC 78kw 用
コントローラ効率	98.5%以上
ギアボックス	SOLECTRIA 製 モーター一体型 10:1
バッテリー	12V58Ah シリコン電解液 鉛酸バッテリー 24 個直列 標準電圧 288V (満充電時 約 320V)
ステアリング	パワーステアリング：電動油圧ポンプ
ブレーキ	ブレーキ用電動バキュームポンプ
ヒータ	PTC(セラミック)ヒータ 2400w
エアコン	電気自動車用横形インバーターエアコン (288V 用)

Table3-3 は、完成したけん引用電気自動車を計測して得た基本性能である。航続距離は完成当初 120km 程度であったが、2006 年に電解液をシリコン水溶液(約 7%希硫酸)とした 12V58Ah の鉛酸バッテリー [光洋(2002)] に取替えたことで約 30%伸びた。

Table3-3 けん引用電気自動車 基本性能

項 目	性 能
最高速度	130km/h (1 人乗車：JARI テストコース)
航続距離：高速道路・渋滞・夜間含む	100km 以上
最大航続距離：一般道・郊外・昼間	156km ('06.8 に記録、1 人乗車)
加速性能	SS400m：20sec 以下

3-2-3 経済性（燃料費）

けん引用電気自動車の運行に関する経済性をガソリン自動車のデータと比較した[Ashida.T. (2007)、新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会(2006)]。

用いたけん引用電気自動車のデータは、第3回 四国 EV ラリーのコースとなった6本のレグの走行パターンで得たものである[芦田(2002)]。

但し、ガソリン自動車の方は、走行パターン毎の消費量計測が困難なため、各走行距離から消費燃料量を予測しガソリン代として算出した。

Table3-4 はけん引用電気自動車の運転経費とガソリン自動車の運転経費の比較結果。

Table3-4 けん引用電気自動車運転経費とガソリン自動車運転経費の比較

※電力料金 ¥10/1kW、ガソリン車燃費 10km/L、ガソリン ¥140/L とした

レグ	走行距離	所要時間	消費電力	電力料金	消費燃料	ガソリン代
2	17.7km	27分	2.63kWh	¥26.3	1.77L	¥248
3	51.1km	1時間10分	6.82kWh	¥68.2	5.11L	¥715
4	33.2km	1時間3分	6.63kWh	¥66.3	3.32L	¥465
5	81.6km	1時間41分	10.35kWh	¥103.5	8.16L	¥1,142
6	78.1km	1時間34分	9.67kWh	¥96.7	7.81L	¥1,093
6-2	38.7km	51分	6.28kWh	¥62.8	3.87L	¥542
合計	300.4km	6時間46分	42.38kWh	¥423.8	30.04L	¥4205.6

3-2-4 けん引用電気自動車についてのまとめ

本研究用のけん引用電気自動車は、1998年の改造登録のための車検を含め既に4回の継続車検を経て10年目に入った。その間、目立ったトラブルもなく使用できているのは基本構造がシンプルであり日常の点検が、バッテリーの管理しか必要でないからである。

前節の通り、燃料費としての電気代もガソリンに比べて非常に安価であり、またシンプルな構造のため故障発生率が低く維持費も高まらないため、交通手段として優れている。

過去にこのけん引用電気自動車には約300人の試乗者がいる。この電気自動車の最大の

特徴である回生制動に馴染めなかったのはそのうち1人だけであった。その1人も回生制動の強力な制動力は評価しながら、自分の意思よりも早く停止するけん引用電気自動車の運転感覚に戸惑いがあったためと、試乗後のアンケートに記されていた。

なお、このけん引用電気自動車には電動エアコンも装備するが、エンジンの排熱がないため車室内の温度上昇が少なく、真夏でもエアコンを使用しなくても我慢できる。このことも内燃機関を動力とする自動車と比べ電気自動車が省エネといえる。

3-2-5 自動車の航続距離

自動車はガソリンを給油すればどこまででも走れるといえる。Table3-5 は自動車の種類による一充填航続距離の比較である。

Table3-5 自動車種類別航続距離の比較

	エネルギー種類	1回の航続距離	エネルギー補給時間
電気自動車 (鉛酸バッテリー) (著者製作 EV CIVIC)	電気	150km	長い
電気自動車 (Ni-MH バッテリー) (RAV4-EV)	電気	215km	長い
電気自動車 (Li-ion バッテリー) (ELIICA)	電気	300km	長い
ガソリンエンジン車	ガソリン	300~500km	短い
ハイブリッド車	ガソリン	500~700km	短い
燃料電池車 (トヨタ FCEV)	ガソリン (メタノール)	330km	比較的短い
プラグインハイブリッド車	電気+ガソリン	500km 以上	短い
電気自動車+けん引發電機 (RXT システム)	電気+ガソリン	500km 以上	短い

3-2-6 レンジエクステンダー(RXT)とその類似方式

3-1 に述べたように、バッテリーだけ搭載の EV の走行距離を伸ばす方法として、RXT とその類似の方法が考えられているので対比して述べる。

Fig.3-3 は、AC Propulsion 社による本研究で製作する方式と同じく、内燃機関 (オートバ

イ用ガソリンエンジン) と発電機を組み合わせた RXT の例である。このシステムは量産による普及を目的には開発されておらず、定量的な評価はなされていない[御堀(1995)、Thomas (1997)、EVnut.com、(参照 2006-10)]。Fig.3-4 は、EV Maine 社の前輪駆動車の駆動部を使ったプッシュトレーラーシステムの製作例である[EV Maine.org、(参照 2006-10)]。電気モータでの走行とともにエンジンでも車輪が直接駆動されるので、走行形態としてはパラレルハイブリッドであると言える。先に述べたように、日本の車両法での認可制限と安全性の問題から、実用性は低いといえる。その省エネ効果や CO₂ 排出についての研究はまだなされていない。[EV Maine.org、(参照 2006-10)]。

Fig.3-5 は、ソーラーパネルを搭載したトレーラで発電電力を得て、牽引車の EV を駆動する RXT の例である。確かに環境に優しいと言えるが RXT の本来の目的である信頼性が高く長距離を走ることがいつでも出来るという観点からすると、実用性は低いシステムであるといえる[EV Maine.org、(参照 2006-10)]。けん引車に比べ非常に大きなトレーラとなるし、日照がないと使えない。



Fig.3-3 オートバイエンジンと発電機を組み合わせた RXT の例

[EV Maine.org、(参照 2006-10)]



Fig.3-4 前輪駆動車の駆動部を使ったプッシュトレーラー [EV Maine.org、(参照 2006-10)]

※日本の法律では使用できない



Fig.3-5 ソーラーパネルを用いた RXT [EV Maine.org、(参照 2006-10)]

3-2-7 被けん引用発電車の製作

けん引式発電機システムを開発するにあたり以下の3項目を目標とした。

目標1： けん引発電機システムは同容量の Li-ion 電池価格に比較して20%以下のコスト

目標2： けん引トレーラを含み同出力の汎用発電機より軽い総重量

目標3： けん引トレーラを含み同出力の汎用発電機より安いコストと生産性

目標4： EV や PHEV と比べ、高い省エネ性・実用性

本節では開発の経緯と性能や有用性について、製作の過程および実験結果を通して述べる。

3-2-7-1 RXT 用発電トレーラの製作

本節では、RXT システムの評価を行うため実際に製作した発電トレーラについて述べる。この節ではまず、その製作過程について述べる。Fig.3-6 は RXT システムのブロック図である。青枠はけん引用電気自動車、緑枠は被けん引発電車を示す。Fig.3-7 および Fig.3-8 に、製作した発電機搭載用トレーラと、そのトレーラに搭載するため専用開発したエンジン発電機の搭載図と完成状態を示す。[運輸省(1996-a)、運輸省(1996-b)]

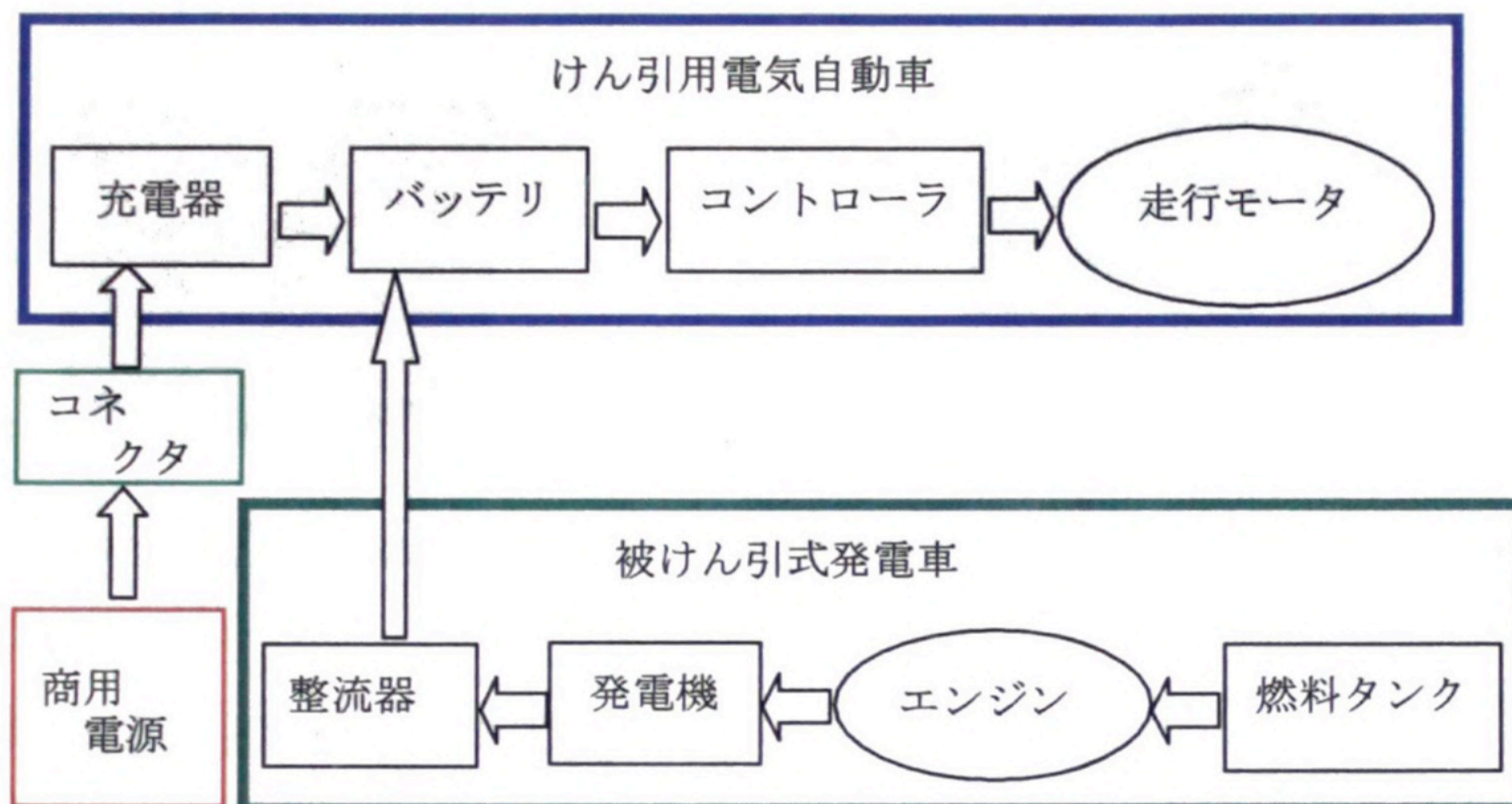


Fig.3-6 製作した RXT システムのブロック図

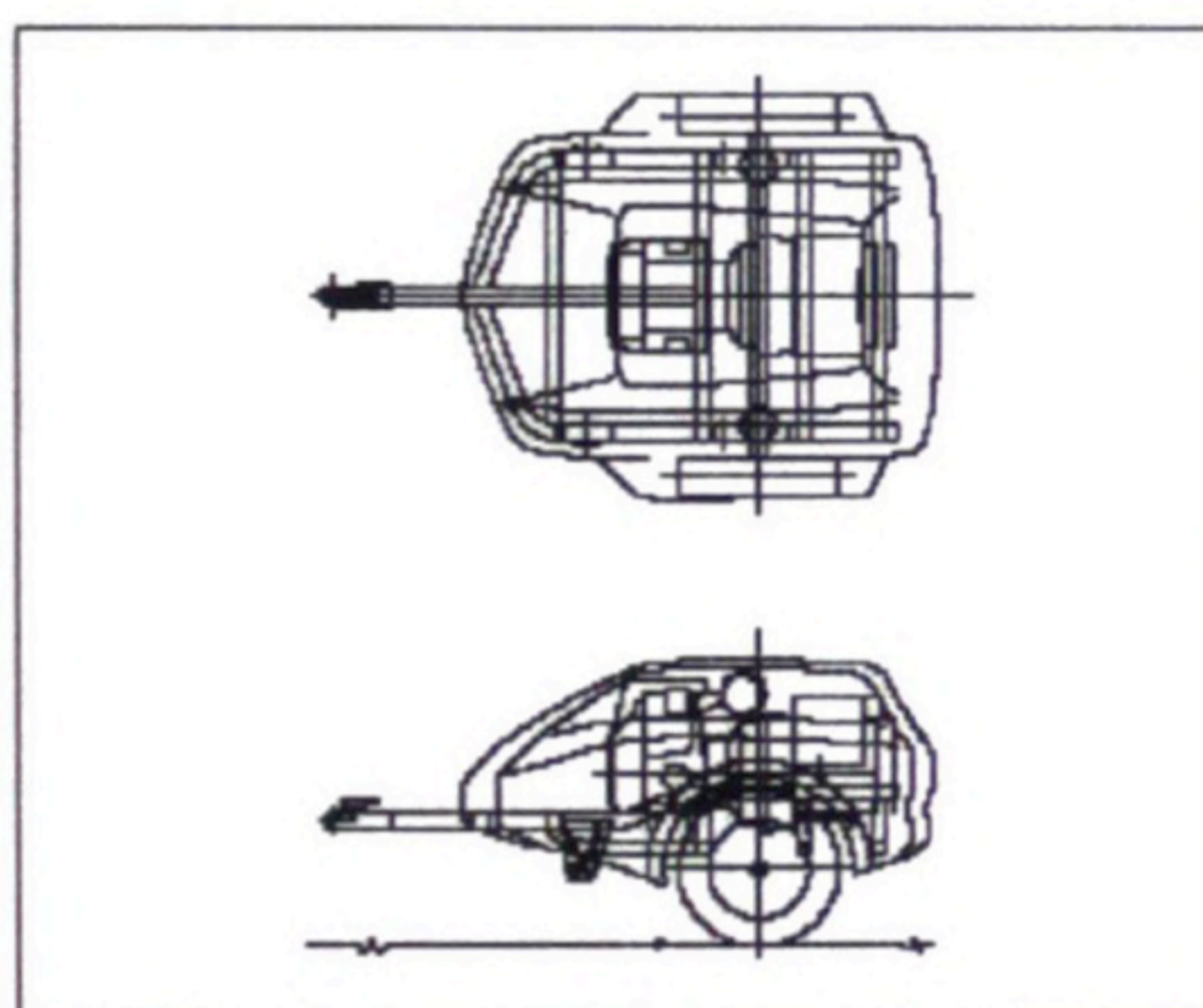


Fig.3-7 被けん引発電車外形図



Fig.3-8 右（前側）けん引用電気自動車
左（後部）被けん引発電車

システムに使用する発電機はけん引式発電機としての移動に際し、できるだけ軽量かつ小型な発電機搭載が望ましい。また、車重 1 トン程度の EV で使用するには、発電出力として 10~20kW が必要である。市販されている汎用の可搬式発電機は Fig.3-9、Fig.3-10 のようにその何れもが大きく重いため、被引式発電車に適さないため、新しく小型で軽量なエンジン発電機を開発した。

Fig.3-10 は検討に用いた HONDA 製 5kVA のエンジン発電機の例である(大きさ：965×590×730 重量：175kg)。Fig.3-11 はデンヨー(株)製 13kVA のエンジン発電機の例である(大きさ：1400×690×930 重量：406kg)。



Fig,3-9 HONDA 3φ200V5kVA(175kg)

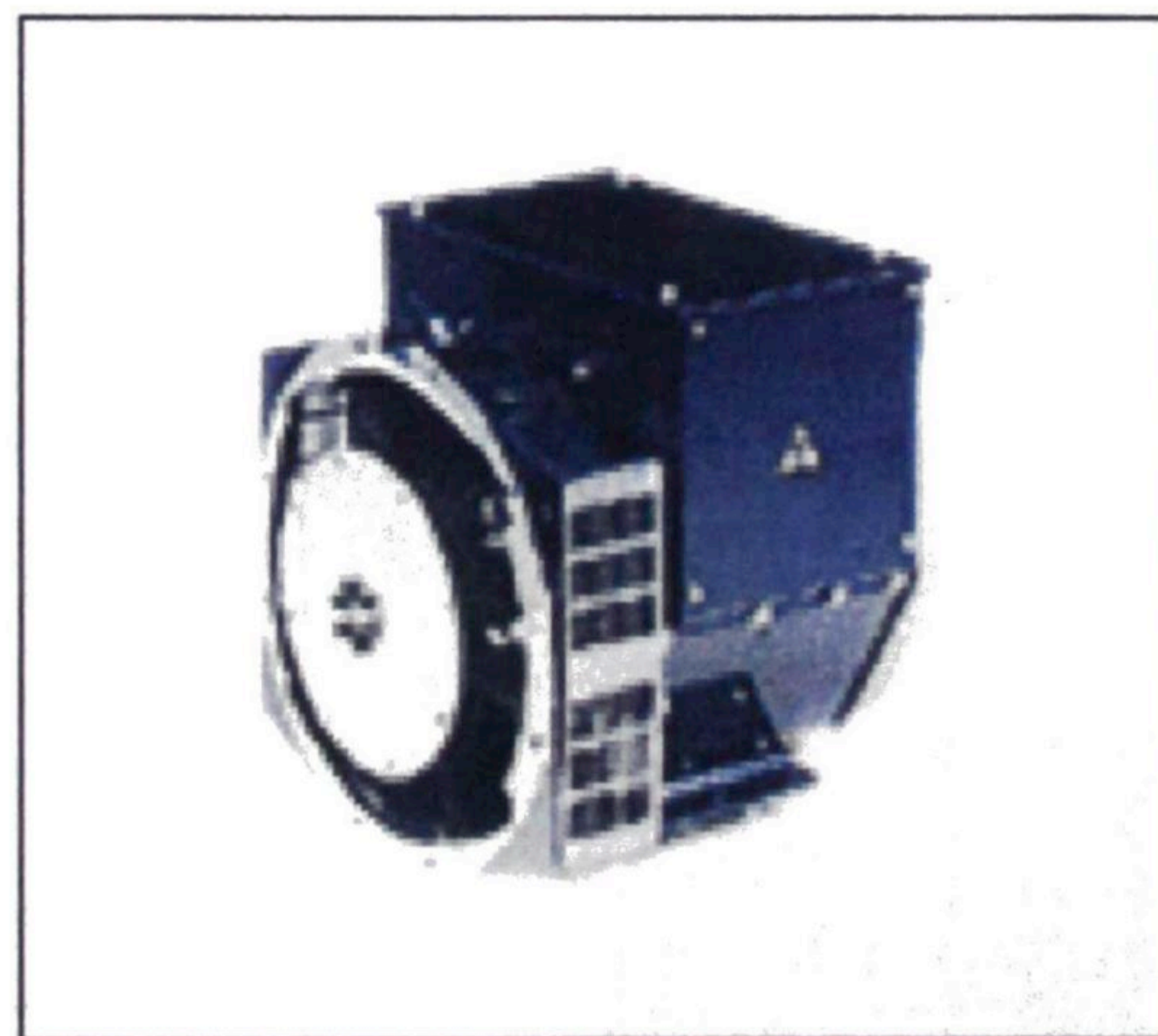


Fig,3-10 デンヨー (株) 3φ200V13kVA(406kg)

3-2-7-2 発電機と内燃機関の選定

小型大容量の発電機として、各社のカタログデータを検討した結果。エンジンに直結する小型船舶搭載用の発電機が比較的小型で軽量な事が判明した[NEWAGE(1997)]。

機種が豊富で目的に合った性能の発電機として、船舶用発電機のうち大きさや重量が希望するサイズに近い、イギリスの NEW AGE INTERNATIONAL 社の BCI-162E 型 3φ60Hz 220V 18.8kVA 15kW を選択した。Fig,3-11 は NEW AGE INTERNATIONAL 社製 BCI-162E 型発電機の写真である (大きさ : 365×410×455 重量 : 110kg)。



Fig,3-11 BCI-162E 型発電機 [NEWAGE(1997)]

また重量・大きさ・構造の簡単さおよび排気ガス中の二酸化炭素排出量の少なさから、空冷の 4 サイクル汎用エンジンが最適と判断した。国産の汎用エンジンの中から HONDA 製輸出向け 90°V 型 2 気筒 4 サイクル 614 cc エンジンを選択した[ホンダ(1993)]。このエ

エンジンを選択した最大の要因は、最大出力 20PS のとき出力回転数が発電機の 60Hz 時の回転数と一致する 3600rpm だからである。Fig.3-12 は HONDA 社製の GX620 型汎用エンジンの外観および外形寸法図である（大きさ： 386×456×452 重量： 42.5kg）。

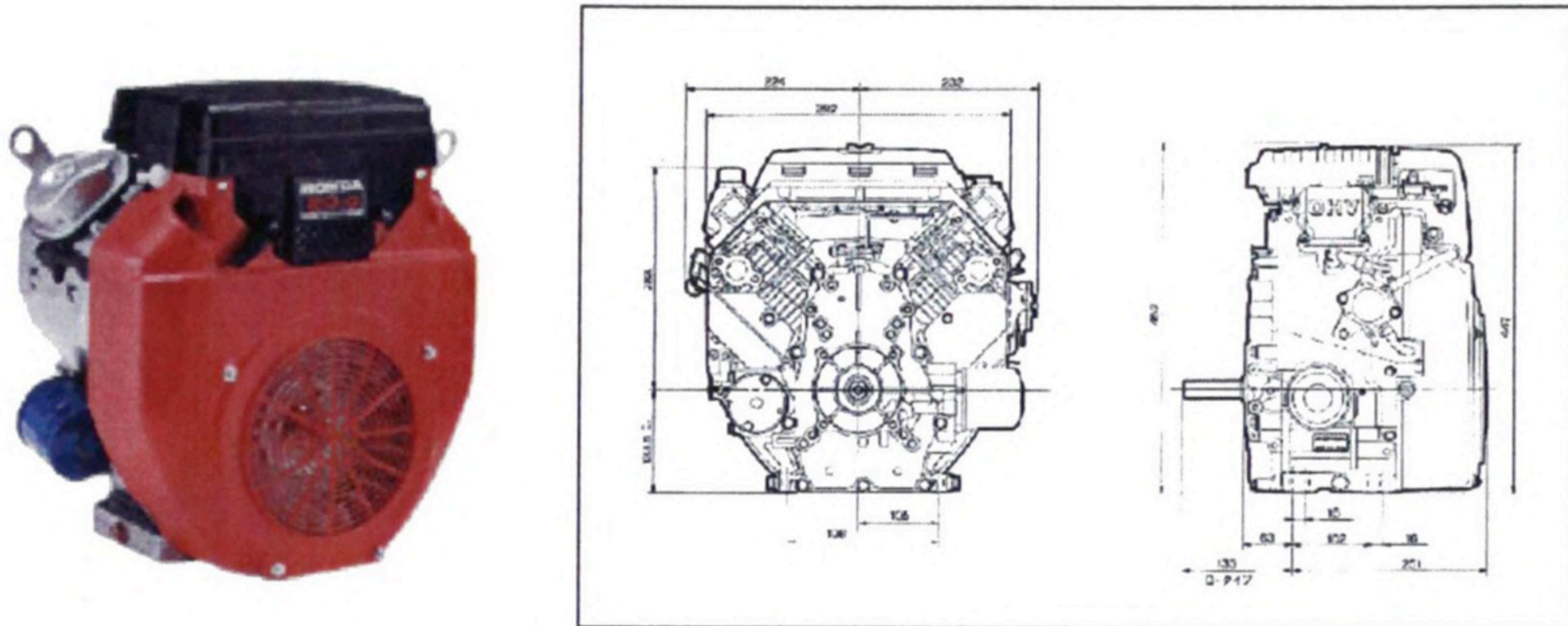


Fig.3-12 GX620 型 汎用エンジン [ホンダ(1993)]

専用の架台および連結フランジを製作して一体型エンジン発電機とした。完成したエンジン発電機は、最大電力 3φ60Hz 220V 18.8kVA 15kW、大きさ： 980×460×490、重量 170kg である。Fig.3-13 はエンジンおよび発電機の連結状態である。Fig.3-14 はエンジン発電機の外観写真である。赤い部分は連結フランジ、発電機は遮熱材で覆っている。

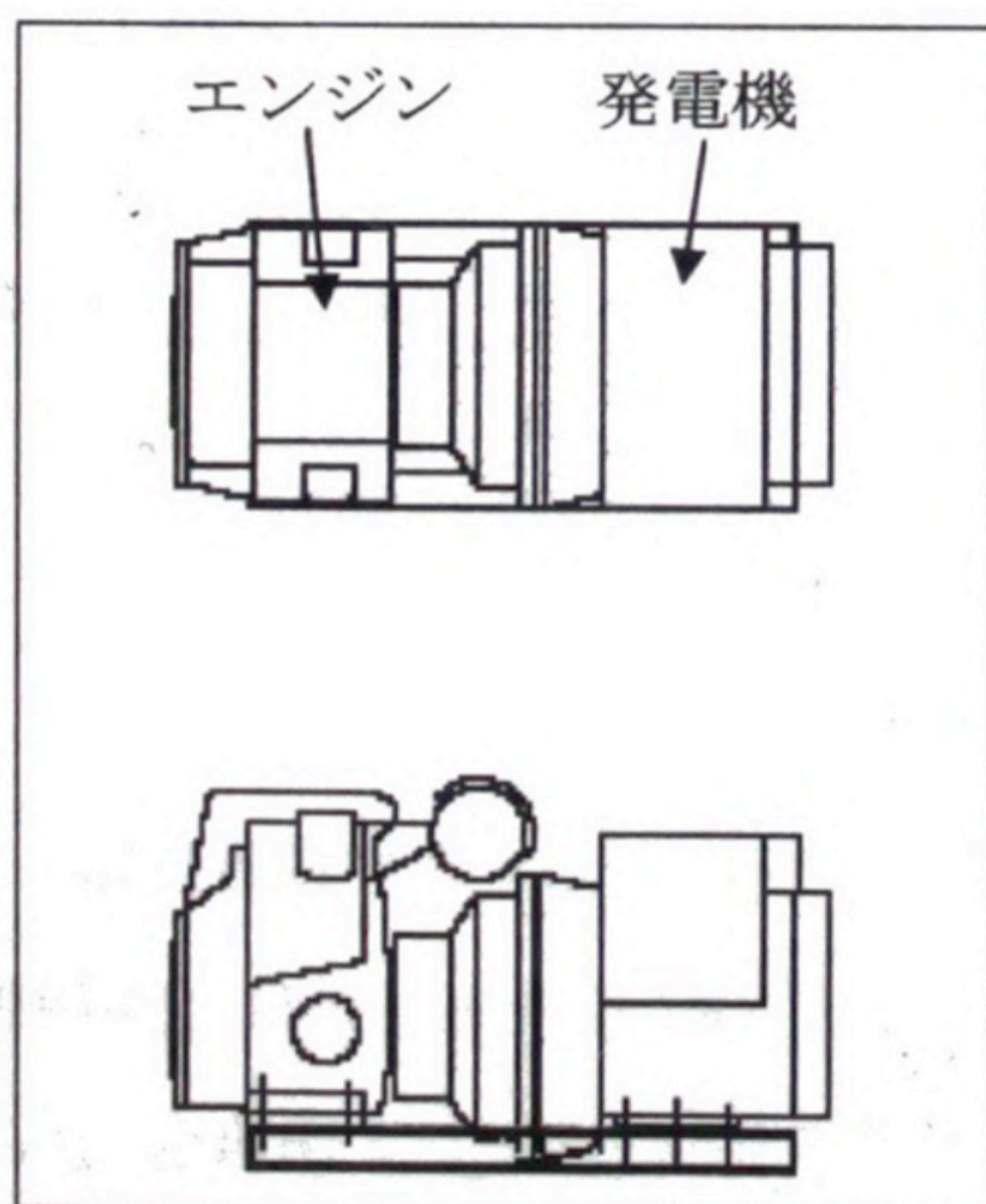


Fig.3-13 エンジン・発電機連結状態



Fig.3-14 エンジン-発電機連結の写真

3-2-7-3 車枠・車体の開発

日本の〔道路運送車両法・道路輸送車両の保安基準〕に基づき、要求される強度・性能を有する被けん引型車両を開発した。製作しようとするエンジン発電機搭載の、被けん引型車両はその寸法および重量から日本での軽自動車の分類となる[運輸省(1996-a)、運輸省(1996-b)、自動車工学編集委員会(1988)]。

Fig.3-15 は製作したフルトレーラー型 被けん引車の外形寸法図である。

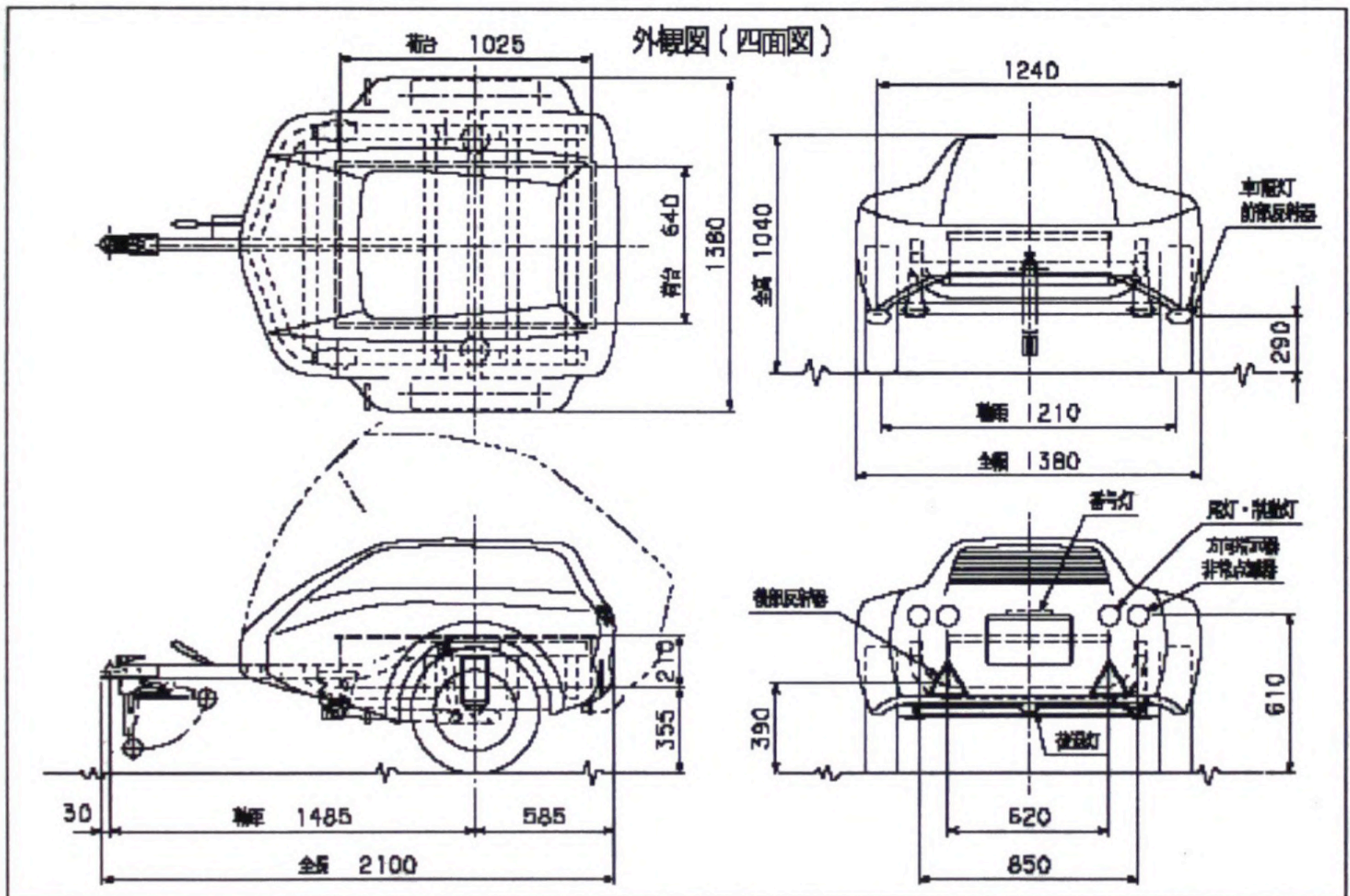


Fig.3-15 製作したフルトレーラー 外形寸法 (申請書類より抜粋)

〔道路運送車両の保安基準〕に適合する専用の車枠を開発した[運輸省(1996-a)、運輸省(1996-b)]。設計した車枠が保安基準を満たしているか CAD を用いて強度確認の構造解析を行い、合理的で十分な強度のあることを確認した。Fig.3-16 に車枠(フレーム)寸法図を示す。Fig.3-17 は車枠の強度確認構造解析(CAD データ)である。解析結果は青い方が応力は小さく、赤になるほど応力大きい。これにより応力の集中が可視化して確認できる。フレームの解析の結果、応力の集中は見られず強度の確認ができた。

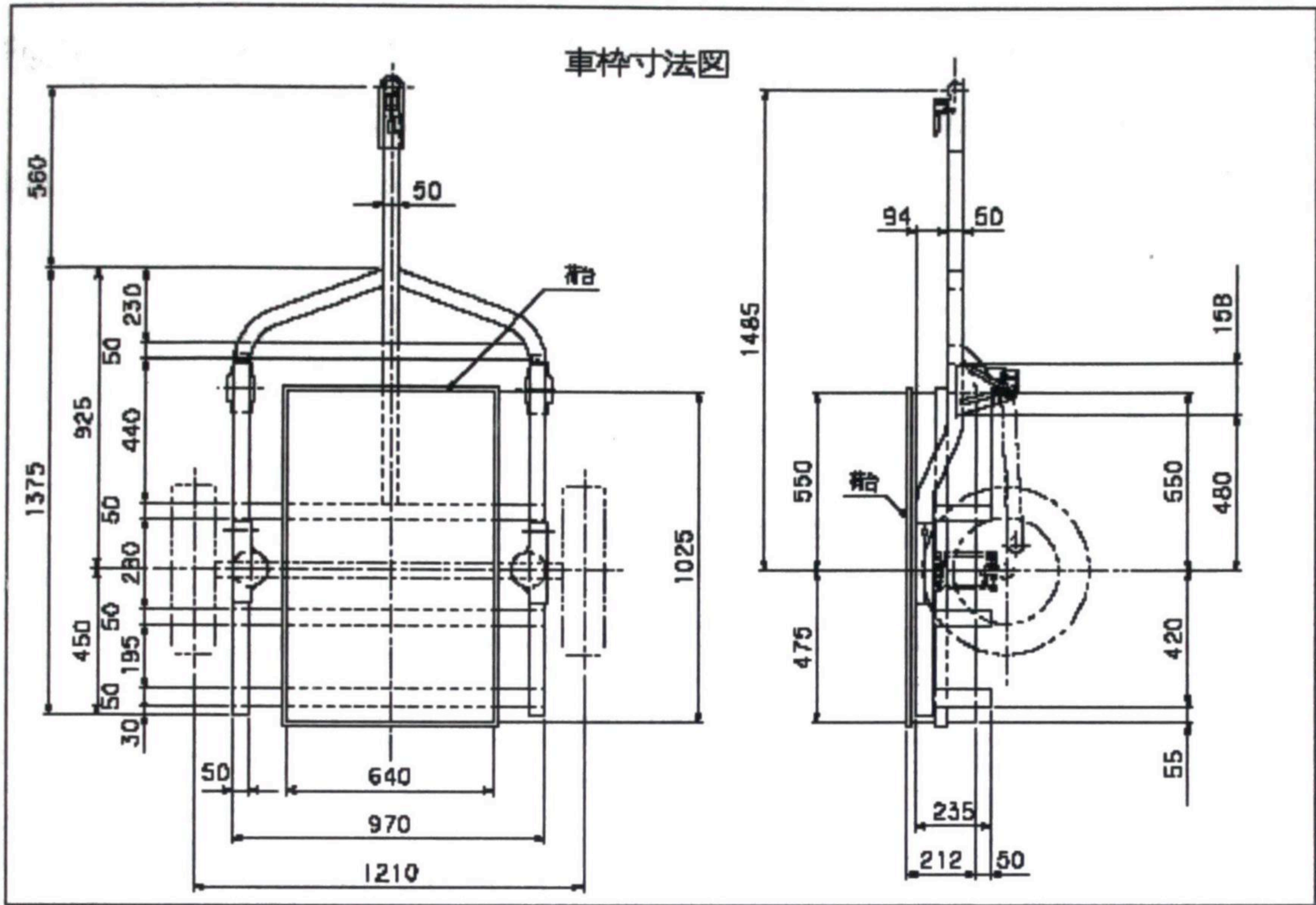


Fig.3-16 車枠寸法図 (申請書類より抜粋)

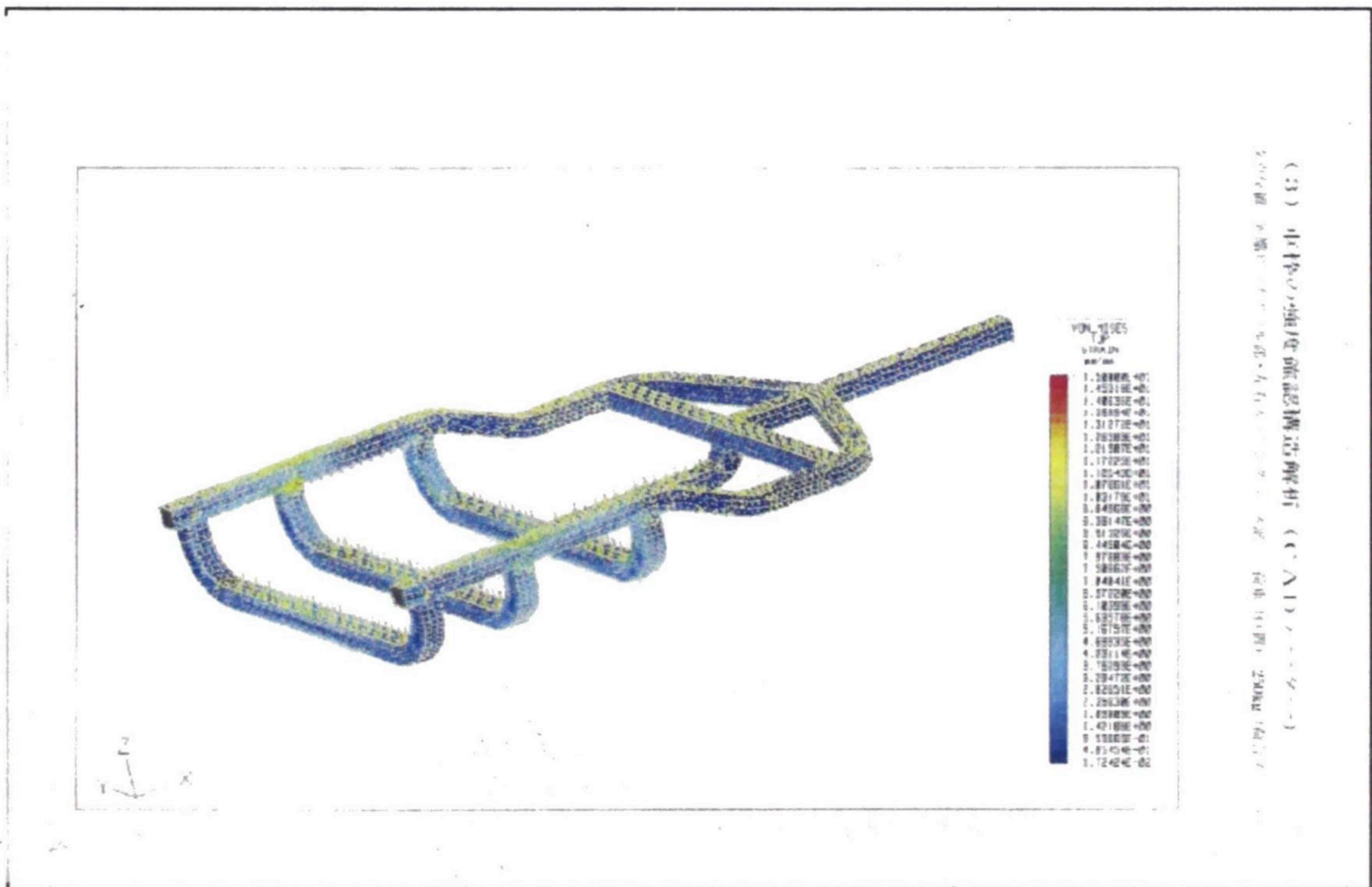


Fig.3-17 車枠強度解析データ (CAD データ) (申請書類より抜粋)

Fig.3-18 本枠の強度計算書 (申請書類より抜粋)

Fig.3-18 は、本研究のため設計・開発したトレーラの〔車枠の強度計算書〕のうち、メインフレーム部分(口形鋼管 50 x 50 x t 2.3 SS400 製)の強度計算書のページ抜粋である。法で要求される安全率：S=1.6 以上に対し計算の結果は S=4.19 となり、十分な安全性を確保できたといえる。

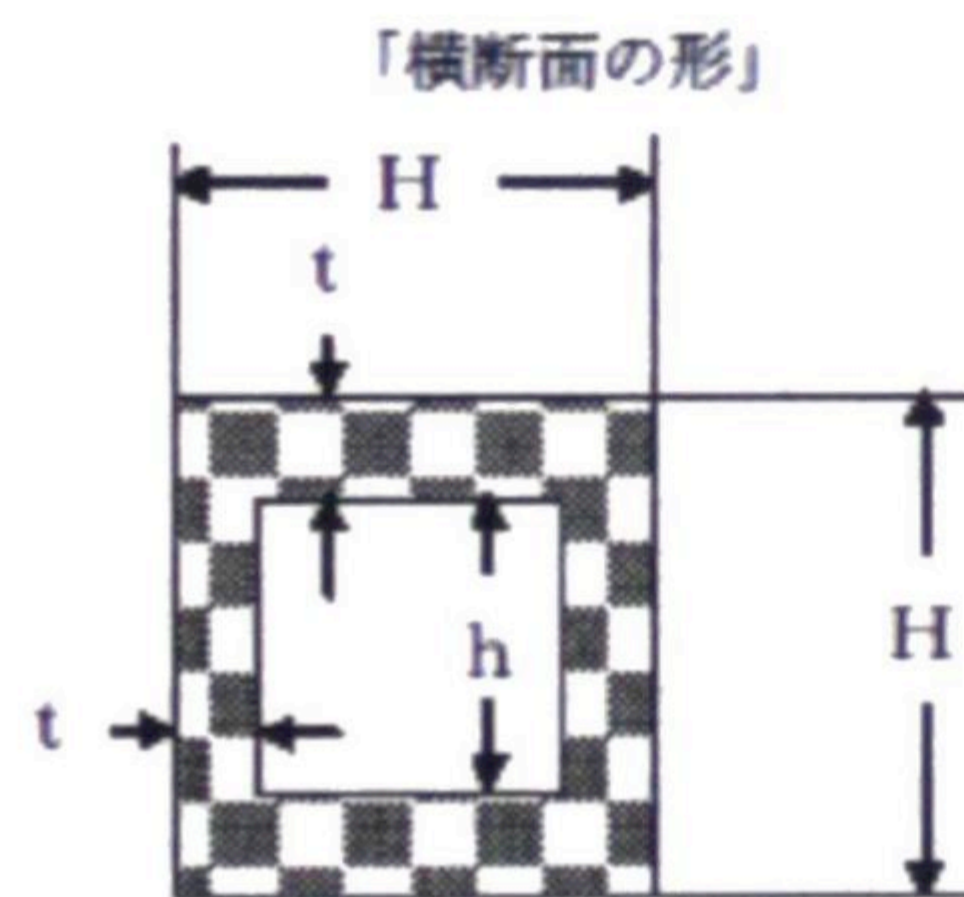
④梁の最大曲げモーメント M

$$M_{\max} = \frac{Wab}{L} = \frac{250 \times 55.0 \times 47.5}{102.5} = 6372.0 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

もしもWが梁の中央にかかるときは、 $a = b = L/2$ であるから

$$M_{\max} = \frac{WL}{4} = \frac{250 \times 102.5}{4} = 6406.3 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

⑤使用鋼材の断面係数 Z



$$\begin{aligned} H &= 5.00 \text{ cm} \\ h &= 4.54 \text{ cm} \\ t &= 0.23 \text{ cm} \\ Z &= \frac{H^4 - h^4}{6H} \\ &= \frac{5^4 - 4.54^4}{6 \times 5.00} \\ &= 6.673 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

※両サイド・フレームの合計 $2 \cdot Z = 2 \times 6.673 = 13.346 \text{ cm}^3$

⑥曲げ応力 σ

M: 曲げモーメント (kg/cm) Z: 断面係数 (cm³) n=2.5 (負荷倍数)

$$\sigma_s = \frac{Mn}{2Z} = \frac{6372.0 \times 2.5}{2 \times 6.673} = 1193.6 \text{ kg/cm}^2$$

⑦安全率 S

σ_s : 材料の許容応力 σ_n : 曲げ応力

$$S = \frac{\sigma_s}{\sigma_n} = \frac{5000}{1193.6} = 4.19 > 1.6$$

故に十分安全である。

Fig.3-18 車枠の強度計算書のうち、メインフレーム部分抜粋

電気自動車にけん引されて走る発電機トレーラであるため、見た目にも一体感のあるデザインのものをご設計した。そのため機能およびデザインを重視した車体をガラス繊維強化プラスチック（FRP）で製作し架装した。Fig.3-19 は、けん引用電気自動車と被けん引式発電車の連結状態図である。Fig.3-20、Fig.3-21、Fig.3-22 にデザインを検討した車体のモックアップを示す。Fig.3-23、Fig.3-24 に完成検査に合格しナンバープレートを取得した完成写真を示す

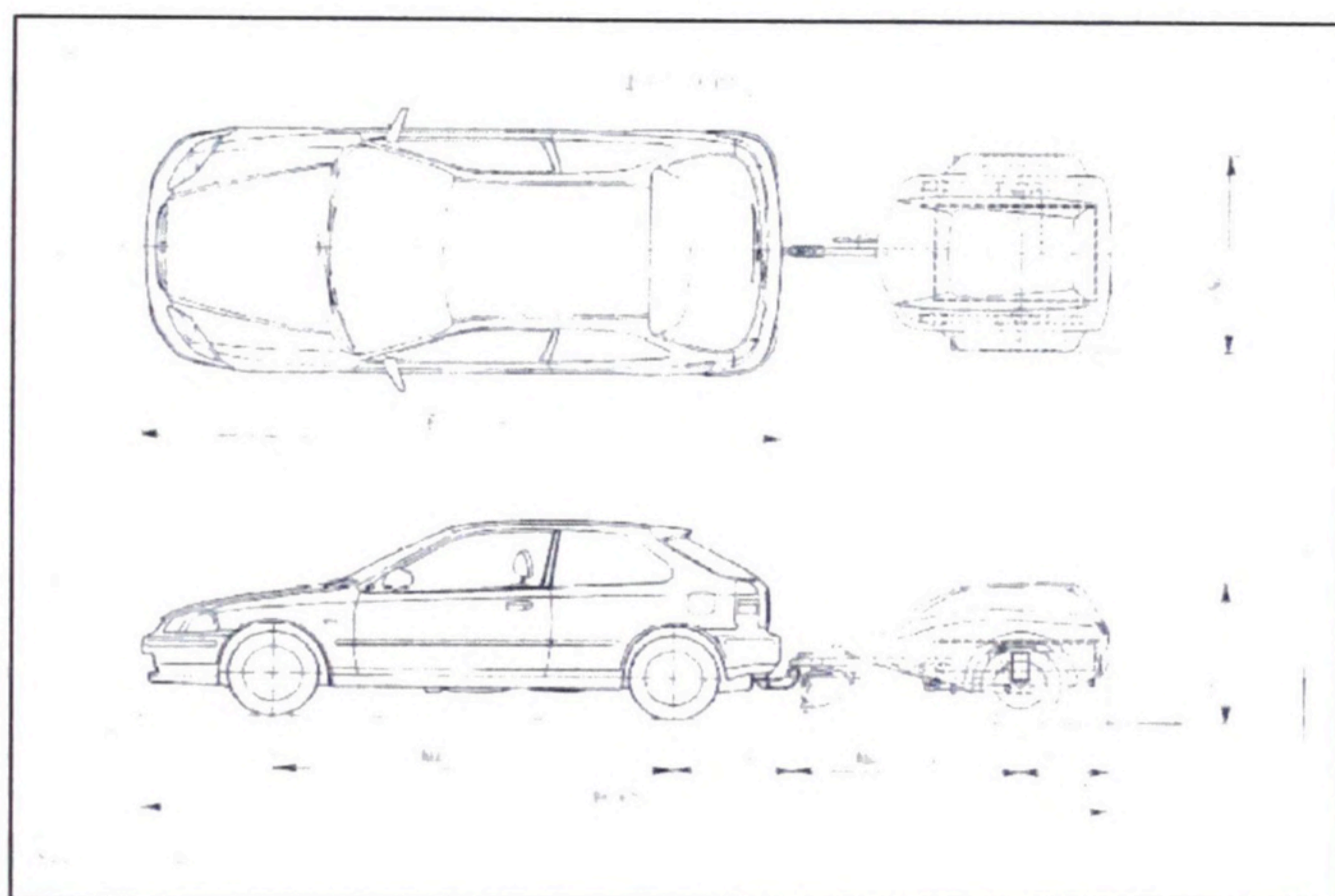


Fig.3-19 けん引用電気自動車と被けん引式発電車の連結状態図（申請書類より抜粋）

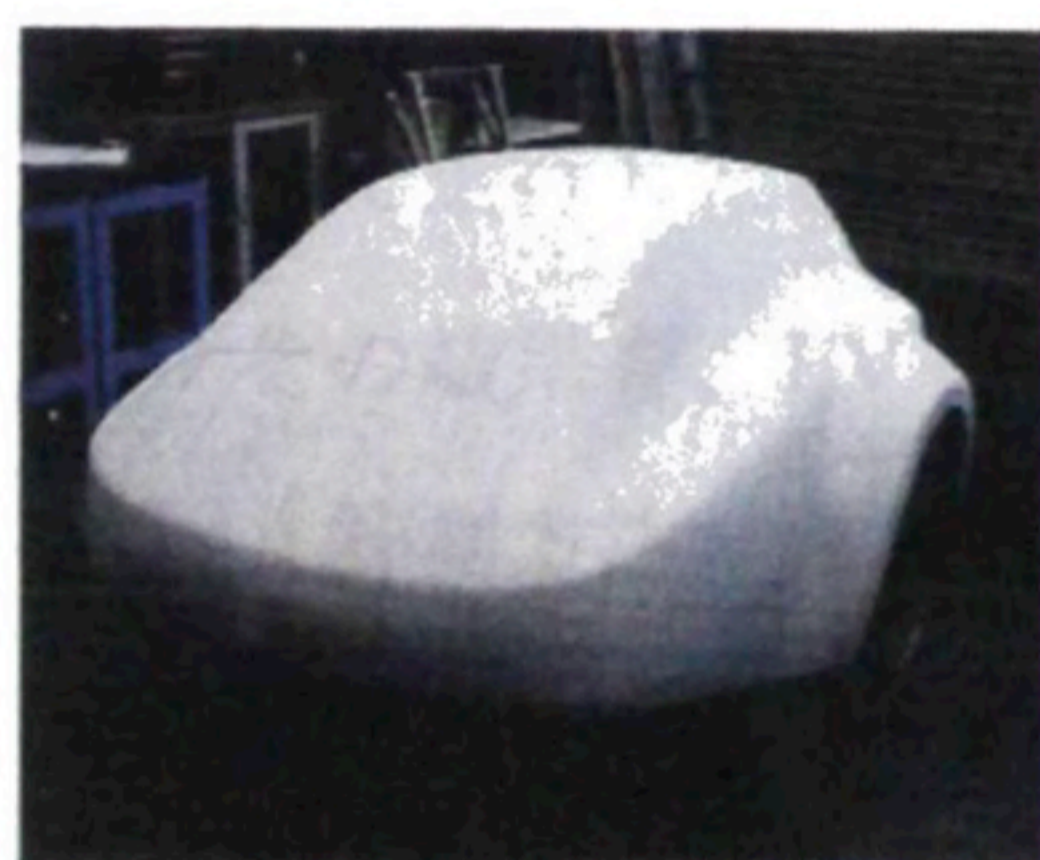


Fig.3-20 モックアップ 左前

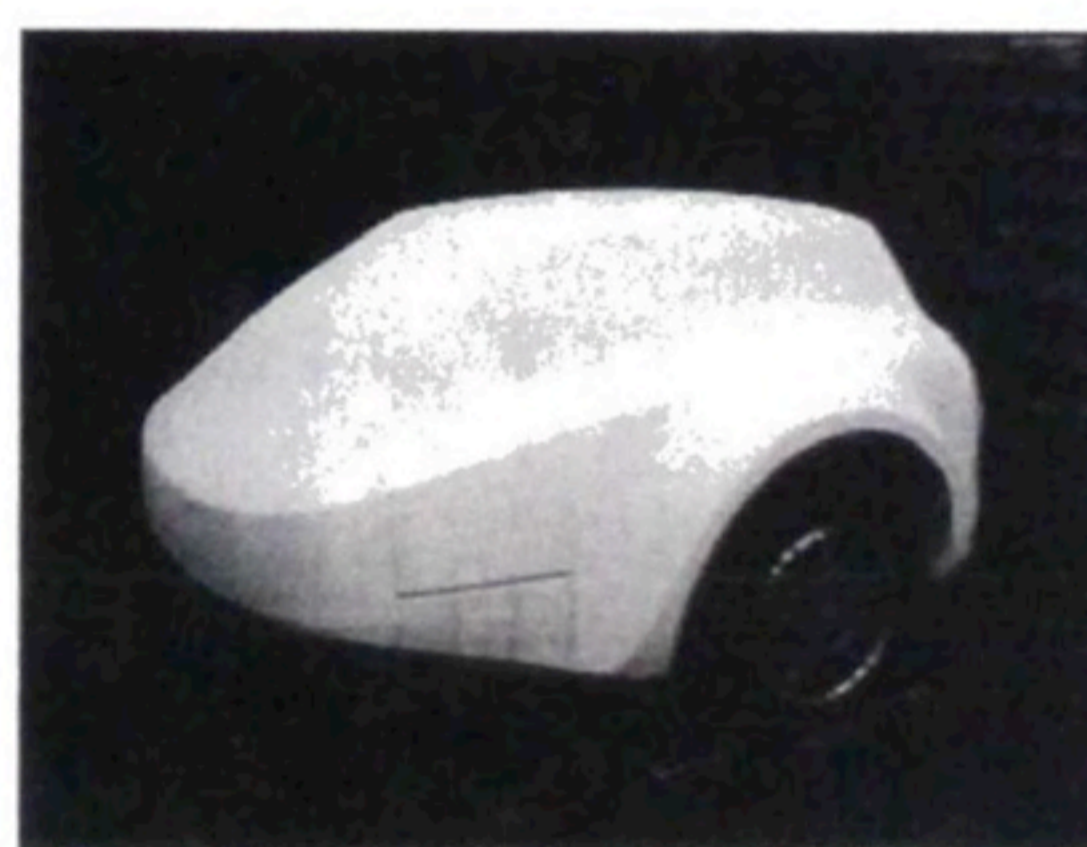


Fig.3-21 モックアップ 左横



Fig.3-22 モックアップ 左後



Fig.3-23 完成写真（RXT 全体）



Fig.3-24 完成写真（後部）

3-3 レンジエクステンダー（RXT）システムの評価

3-3-1 走行性能試験

車両の速度特性、燃費等を定量的評価し、その諸元を得るには、走行性能の試験を行う必要がある。この節では、著者の製作した RXT システムを使って走行試験をした結果について述べる。ここで EV とは、けん引車用電気自動車のみで走行した場合で、RXT とは、けん引用電気自動車と被けん引式発電車で RXT システムを構成した場合である。

(1) 車体の各種走行抵抗係数の導出

惰行法を用い、60km/h から 40km/h までの減速時間を測定し、空気抵抗係数と車体正面投影面積 S の積である $Cd \cdot S$ と、転がり抵抗係数 μ を求めた。電気自動車だけで走行した場合と、電気自動車に発電トレーラを結合した RXT 状態で測定した。その結果を、EV モードは Table3-6、RXT モードは Table3-7 に示す。

計測方法：車両を 60km/h 以上まで加速し、アクセル OFF・回生 OFF 状態で速度計が 60km/h に低下した時点で計測開始、50km/h・40km/h の各々経過時間を 1/100 まで計測できるストップウォッチで計測、各 4 回実施し最長・最短を無効とした。

Table3-6 走行抵抗測定試験の結果（EV モード）

	60km/h から 50km/h	50km/h から 40km/h
時間 (第 1 回目)	11.76 秒	14.37 秒
時間 (第 1 回目)	11.05 秒	14.66 秒
時間 (平均)	11.41 秒	14.515 秒

この計算式と値

Table3-7 走行抵抗測定試験の結果 (RXT モード)

	60km/h から 50km/h	50km/h から 40km/h
時間 (第 1 回目)	10.65 秒	14.01 秒
時間 (第 1 回目)	11.24 秒	13.12 秒
時間 (平均)	10.95 秒	13.565 秒

これらの走行試験から得られた走行特性を Table3-8 に示す。

Table3-8 EV モードおよび RXT モードの走行特性

	Cd・S	μ
EV モード	1.49	0.0074
RXT モード	1.73	0.0095

EVと比較して、RXTでは発電機をけん引することにより350[kg]重量が増加し、Cd・Sと μ の値も増加したことがわかる。RXTシステムでは、車軸が3つになったが、被けん引式発電車の車重は、けん引用電気自動車に比べ約22% ($350/1598=0.219$) であり、 μ は軸の数と車重の積に比例するので、全体としての μ は理論的には軸数と車重比より、 $1.5 \times 0.219=0.328$ だけ増加することになる。

実際の走行抵抗測定の計測値によると、 μ の増加率は1名乗車時で、 $0.0095/0.0074=1.283$ となり、実際の μ は28.3%増加していることがわかる。

(2) 走行に必要な電力の特性

車両の走行性能が与えられれば、ある一定速度における必要電力 P を計算することが出来る。Fig.3-25 は、本 RXT システムにおける一定速度に対する電力 P を計算した結果を示したグラフである。比較した PHEV(バッテリー 15kWh)および PHEV(バッテリー 10kWh)とはプラグインハイブリッド車の搭載バッテリー容量を示す。日本の高速道路で牽引する場合の法定最高速度である、時速 80km/h で走行するには約 15kWh 必要なのが見える。実際の高速走行時の時速 80km/h において、バッテリーの充放電電流はゼロになり、その際の発電量と使用電力は等しい結果が保たれており、この計算式と良く一致することがわかった。

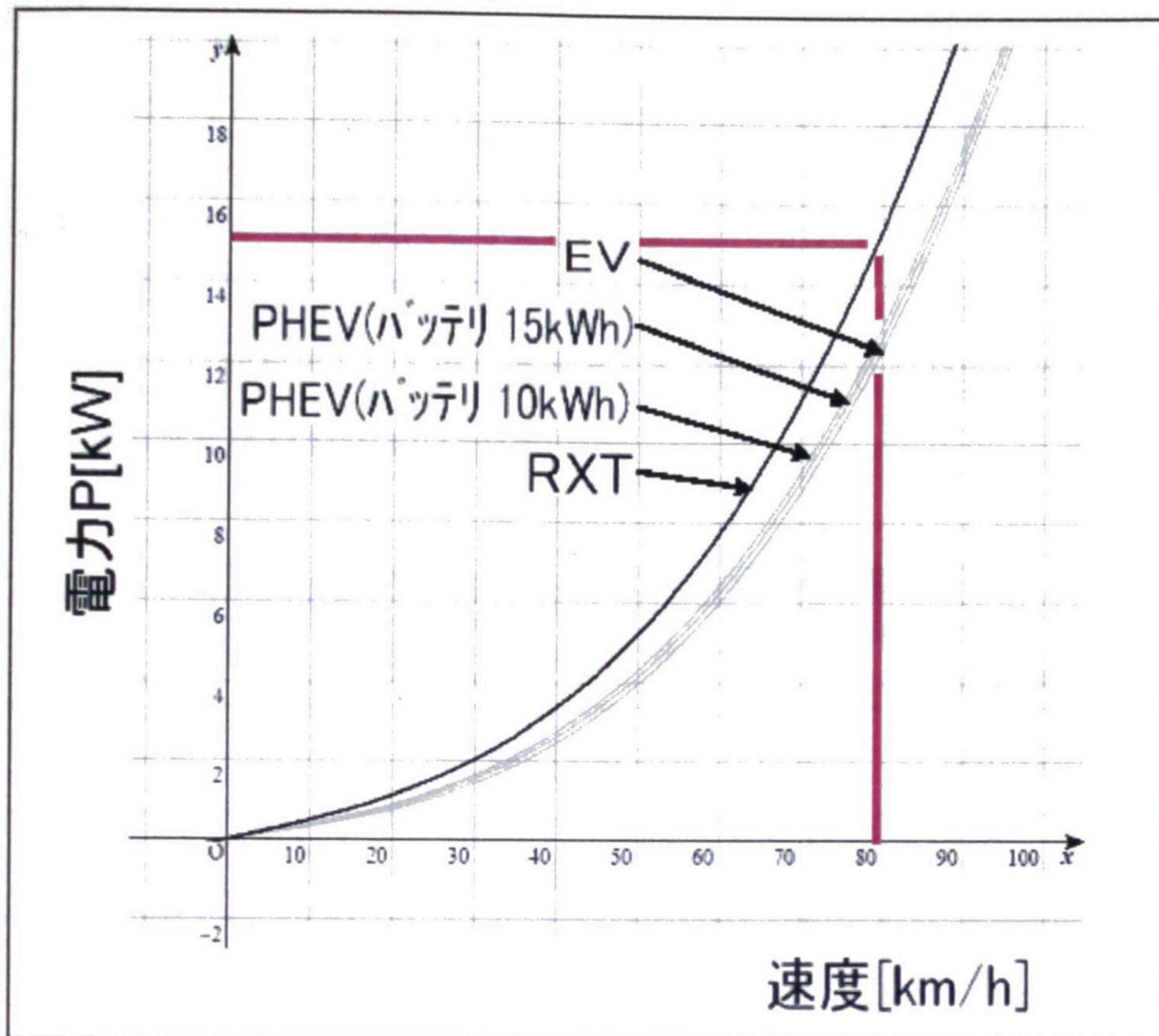


Fig.3-25 電気自動車の速度と必要電力の関係

(3) 車両の走行に必要なエネルギーのシミュレーション

車体の走行性能が分かったので、これを用いて車両走行に必要なエネルギーをシミュレーションで求めた。加速抵抗を加えた計算をする必要があるため、計算には、日本の10-15走行モードを用いた。Fig.3-26はその速度プロファイルである。

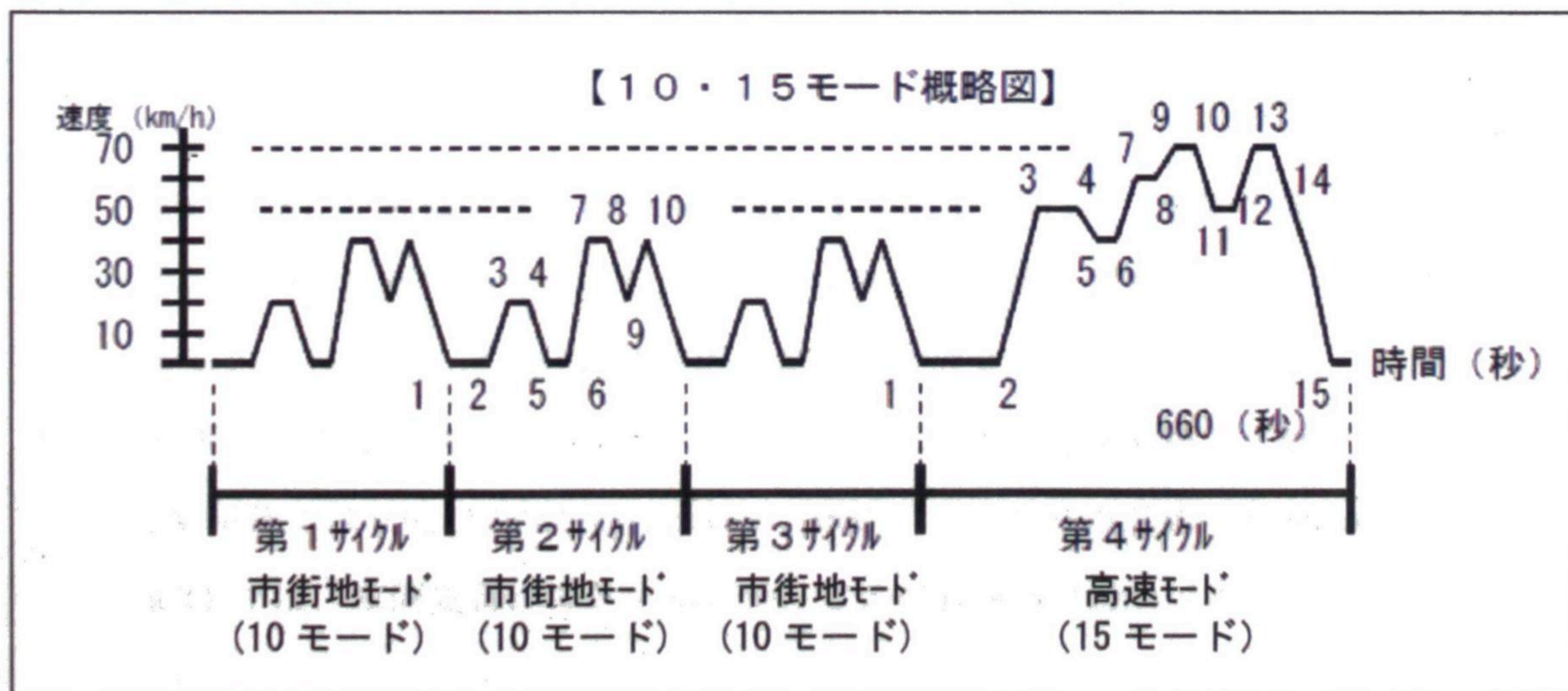


Fig.3-26 10-15 走行モードの速度プロファイル

必要なエネルギー U は次式で与えられる。

$$U = \int P(t) dt$$

ここで、 P は時刻ごとに必要な電力である。必要な単位距離当たりの平均エネルギーを求めた結果を Table3-9 に示す。

Table3-9 単位エネルギーあたりの走行可能距離の計算結果

	10-15モード全体のエネルギー	単位エネルギーあたりの走行可能距離
EVモード	580 [Wh]	7.03 [km/kWh]
RXTモード	747 [Wh]	5.48[km/kWh]

(4) 1週間のライフサイクルにおけるEV、PHEV、RXTの燃費性能の比較をする。

下記の条件で自動車を1週間使用すると仮定する。

- 1週間の中で1日だけ100kmの遠出をおこなう。
- その他の6日間は、1日に20kmの移動距離とする。
- 充電効率やバッテリーからモータ出力に至るまでのエネルギー効率は、無視して考える。
- EVとPHEV、RXTで使用する発電機のパラメータは同一とし、発電機からバッテリーへの充電効率やバッテリーからモータ出力に至るまでのエネルギー効率は、無視して考える。

つまり、車両パラメータ ($C_d \cdot S$ 、 μ) と車両重量の変化によってどのように燃費が変化するかを考察する。Table3-10は、その結果である。1週間の間に必要な総エネルギーの計算結果も示した。最近、電費という概念が提案されている[新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会、(2006)]。

車両に必要な1週間あたりの必要エネルギーを車体重量で割った値で表わすと、EV単体では0.0211 [kWh/kg/week]で、PHEVでは0.0199 [kWh/kg/week]であった。RXTでは、車両重量が変化するため、この値は単純に計算できない。

Table3-10 走行抵抗および重量変化に伴う燃費の変化

	車体重量 [kg]		$Cd \cdot S$ [m ²]	μ	10-15 モードに当ては めた走行可能距離 [km/kWh]		1週間の車両に必 要なエネルギー [kWh/week]
EV	1485		1.49	0.0074	7.03		31.3
PHEV ※1	1836 ※2		1.49	0.0074	6.03		36.5
RXT	1835	1485 ※3	1.73	0.0095	5.46	7.03 ※3	35.4

※1 バッテリ容量は 15 [kWh]で 31.2 [Wh/kg]

※2 発電機の重量を 350 [kg]に設定

※3 発電機を取り外した場合

Table3-10 によれば、現在その研究が進められている PHEV に比べ、RXT システムの方が、1 週間あたりの必要エネルギーが少ないことがわかった。電力のみの EV については、100km 以上を一充電で走ることは現状では困難である。したがってこの 3 つの方式の中で RXT が優れていることがわかった。

3-3-2 EV とレンジエクステンダーシステムを構成したときの車両諸元

完成した RXT 用システムの各諸元は以下の通りである。Table3-11 は発電車をけん引する電気自動車の諸元表を示す。Table3-12 は製作した発電車トレーラの車両諸元表を示す。Table3-13 はレンジエクステンダーシステムとしてのエンジン発電機セットの諸元表を示す。

Table3-11 けん引用電気自動車諸元

原動機形式	AC3φインダクションモータ
モータ出力	定格：18kW、最大：67kW
トルク・回転数	140Nm ・ 0～12000rpm
車輻重量	1318kg（試験時：1414kg）
車輻総重量	1538kg（定員4名）
最高速度	130km/hr 以上
ベース車両	ホンダ シビック
車両分類	普通小型乗用車
長さ	4180mm
幅	1695mm
高さ	1375mm

Table3-12 被けん引車・トレーラ車両諸元

車名	組立車
型式	HB-EG15
自動車の種別	軽（被けん引1軸2輪）
用途	特殊：電源トレーラ
車体の形状	フルトレーラー
長さ	2130mm
幅	1380mm
高さ	1040mm
車輻重量	125kg
最大積載量	250kg
車輻総重量	375kg

Table3-13 エンジン発電機セット諸元

エンジン	エンジン	汎用ガソリンエンジン 614cc V型2気筒
	最大出力	20Hp
	冷却方法	強制空冷
発電機	発電機	ブラシレス回転界磁型 （特別仕様） （1ベアリング）
	接続方法	フレキシブルフランジ 接続
	電氣的仕様	設定：AC3φ 250V
	最大発電能力	15kW
	制御	自励 AVR 制御
	冷却方法	強制空冷
整流器	整流器	1600V3φダイオードモジュール
	電流容量	30A 5個、最大電流 150A
	入力電圧	AC 3φ 約 250V
	出力電圧	DC 約 350V
性能	回転数	3000rpm
	最大出力	DC 350V 15kW
	定格出力	DC 350V 11kW
	巡航速度	70～75km/h ※エンジン発電機の定格出力の電力のみで走行可能な巡航速度

性能評価試験

けん引式発電機の性能や機能、安全性を検証するため数度の長距離走行の評価試験を実施した。その結果 RXT システムとして Table3-14 のような走行性能および経済性の確認ができた。けん引用電気自動車に 2 人乗車し、被けん引式発電車との総重量が約 1900kg にもなることを考慮すると、検証時に得られた平均燃費 11.65km/ℓ は比較的高燃費であると言え、RXT システムでは必要時以外は EV として使用することを考慮すると、経済的であることをこの結果は示している。

この検証データの項 1~4 は 90%以上、項 5 は 40%が高速道路走行における結果である。

正確な検証は実施していないが、エンジンより排出される大気汚染物質の排出量は、ガソリンエンジン自動車の発進・加速・減速の度にエンジンの回転数・出力の変化する状態に比べ、最適化され一定の回転数で運転する発電機の方が少ないことは通説とされており、製作したシステムは高燃費とあわせ地球環境に配慮したシステムであるといえる。Table3-14 は、けん引式発電車のレンジエクステンダーとしての長距離走行の記録である。Fig.3-27 は完成したシステムのけん引状態の写真である。Fig.3-28 は、フルトレーラーへの発電機搭載状態を示す写真である。Fig.3-29 は、雨の東名高速道路走行の写真である。Fig.3-30 は、著者が行った四国 1 周「四国 EV 駅電の走行ルート」 [Miyashita.K. (2003)] を示す図である。(赤は高速道路、緑は一般道、点線はフェリーポート)

Table3-14 けん引式発電機 シリーズハイブリッド長距離走行記録

	年月	行 先	走行距離	燃料消費量	平均燃費	走行時間
1	'99. 8	徳島県往復 (四国 EV ラリー)	330km	26.7ℓ	12.4km/ℓ	4h15m
2	'99. 9	茨城県往復 (筑波 : JARI)	1204km	107.9ℓ	11.16km/ℓ	20h57m
3	'99.10	高知県往復 (大豊町)	597km	53.9ℓ	11.08km/ℓ	10h45m
4	'99.11	愛知県往復 (ナコヤマモーターショー)	350km	31.6ℓ	11.06km/ℓ	5h45m
5	'02. 8	四国 1 周 (四国 EV 駅電)	810km	62.3ℓ	13.00km/ℓ	17h05m
合 計			3291km	282.4ℓ	11.65km/ℓ	58h47m



Fig.3-27 レンジエクステンダー(RXT)システムの写真



Fig.3-28 発電機搭載状態の写真



Fig.3-29 雨の東名高速道路走行中の写真



Fig.3-30 四国1周「四国EV駆電の走行ルート」図 [Miyasita.K. (2003)]

目標達成の検証

被けん引式発電車の各開発目標について検証した。

被けん引式発電車のコストと総重量

完成した、被けん引式発電車を生産する場合のコストは約¥75,000、乾燥重量 297.5kg、重量 325kg である。 Table3-15 は、被けん引式発電車の重量および価格

Table3-15 被けん引式発電車の重量および価格

部 品 ・ 部 位	重 量	価 格
NEW AGE INTERNATIONAL 社製 BCI-162E 型発電機	42.5kg	¥120,000
HONDA 社製の GX620 型汎用エンジン	110kg	¥140,000
マウントベース、カップリング、排気管	20kg	¥50,000
燃料タンク (30 リッター)	27.5kg	¥30,000
フレーム	30kg	¥50,000
車軸・サスペンション・タイヤ	35kg	¥60,000
制御盤・整流器	5kg	¥75,000
外装車体	20kg	¥150,000
電装・補機類	15kg	¥25,000
荷台、その他	20kg	¥50,000
総合計	325kg	¥750,000

3-3-4-2 目標とした各項目の検証

目標 1 : 【けん引発電機と同重量の Li-ion 電池価格に比較して 20% 以下のコスト】

比較したのは重量がエンジン発電機とほぼ同じとなる、韓国製 Li-ion 電池、マイクロビートルラボ社製 24V 15Ah、大きさ：72×155×270 重さ：4.2kg、この Li-ion 電池は 12 直列・

並列で 288V 60Ah 201.6kg となり、けん引用電気自動車の搭載バッテリー容量に匹敵する。けん引式発電車の価格 ¥750,000 を比較すると 11.6% で、目標を達成した。

目標 2 : 【けん引トレーラを含み同出力の汎用発電機より軽い総重量】

の出力の汎用発電機と重量を比較、可搬式発電機メーカー、デンヨー (株) 社製 TLG-L3ESY 型発電機、乾燥重量 406kg と総重量 325kg を比較すると 79.5% で目標を達成した。

目標 3 : 【けん引トレーラを含み同出力の汎用発電機より安いコストと生産性】

量産する場合の価格 ¥750,000 を、デンヨー (株) 社製 TLG-L3ESY 型発電機乾燥重量の価格と比較すると 52% で目標を達成した。また生産性については特殊なエンジンや専用発電機を用いず、エンジンも発電機も汎用製品を使用することで調達が容易であり、AC Propulsion 社 [Thomas B. Gage (1997)] のけん引発電機のオートバイエンジン流用と比較してもコスト・生産性両面から優れているといえる

目標 4 : 【EV や HEV、PHEV と比べ、高い省エネ性・実用性】

各種走行試験および 3-3 に述べたシミュレーションの結果や、一充填による走行可能な航続距離から、レンジエクステンダー (RXT) システムは、高い省エネ性と実用性を備えているといえる。

また、開発して 8 年目の 2007 年 8 月、国土交通省からこの被けん引型発電機車は非常電源車として認められ、特殊車輛として登録変更した。これにより開発の目的の一つであった、災害時出動の非常用電源車としての用途に使用できることとなった。

汎用エンジンと船舶用発電機を使用することによるメリットは、コストだけに留まらず、論文『Low-Emission Range Extender for Electric Vehicles.』 [Thomas B. Gage (1997)] に示したように、モータサイクルエンジンを流用することによる、構造の複雑化をさけられる点にある。またけん引式発電機を製作して 8 年目になる今まで、問題なく使用できている耐久性は構造の単純な汎用エンジンと船舶用発電機の選択に間違いが無いことの証明である。

3-3-5 プラグインハイブリッドとの比較

最近相次いで発表されるプラグインハイブリッドのシステムは、従来のハイブリッド車より大きい容量のバッテリーを搭載し、EV の能力を向上させるシステムである。しかし、常にバッテリーと発電機を搭載しているため、コストや効率の面で最適とは言い難い。本研究で述べたようなレンジエクステンダーシステムでは、短距離移動は搭載バッテリーだけで

り、長距離移動はけん引式発電機を使うことで、従来にはない電気自動車の広い利用を
能にした。プラグインハイブリッドより更に効率の良い EV とすることが出来る。

16 は本研究の検証に用いたけん引用電気自動車の四国 EV ラリーでの実走行から得
データをもとにしたガソリン 1L あたりの走行距離（燃費）を表している。

Table3-17 は本研究に用いたけん引用電気自動車と、公開されている報告書[日渡(2006)]
プラグインハイブリッドの経済性（燃費）を比較した表である。

Table3-16 けん引用電気自動車 燃費計測結果

※ガソリン 1L の理論エネルギーは低位発熱量 8776Wh とする

検証の機会	走行距離	消費電力	消費電力を ガソリン消費 量に換算	燃費 (km/L)
1999 年 第 2 回 四国 EV ラリー	283.1km	23.220kWh	2.65L	106.8km/L
2000 年 第 3 回 四国 EV ラリー	364.0km	25.917kWh	2.95L	123.4km/L
2001 年 第 4 回 四国 EV ラリー	344.0km	27.847kWh	3.17L	108.5km/L
2002 年 第 5 回 四国 EV ラリー	294.4km	23.294kWh	2.65L	111.1km/L
合 計	1285.5km	100.278kWh	11.43L	112.5km/L

Table3-17 けん引用電気自動車・プラグインハイブリッド燃費比較 [日渡(2006)]

種類	検 証 例	ガソリン換算 燃費 (km/L)
PHEV	電力中央研究所 報告 PHEV32 (32km 電気走行可能な PHEV)	49.8km/L
PHEV	電力中央研究所 報告 PHEV96 (96km 電気走行可能な PHEV)	48.4km/L
EV	研究に用いた電気自動車 EV CIVIC (鉛蓄電池)	112.5km/L

自動車の日常的使用状況とその影響

Fig.3-31 は、平日に自動車をどの程度使用されるかの調査をおこなわれた結果である。1
当たりの走行距離で 40km 以上走行する車両が最も多く、15km 以下の車両がそれに次ぐ

がわかる。その何れも田舎および郊外を走行する距離が、市街地を走行する距離を上回ることが示されており、40km以上走行する中にRXTの用途があることがわかる。[Adrianusほか(2006)]

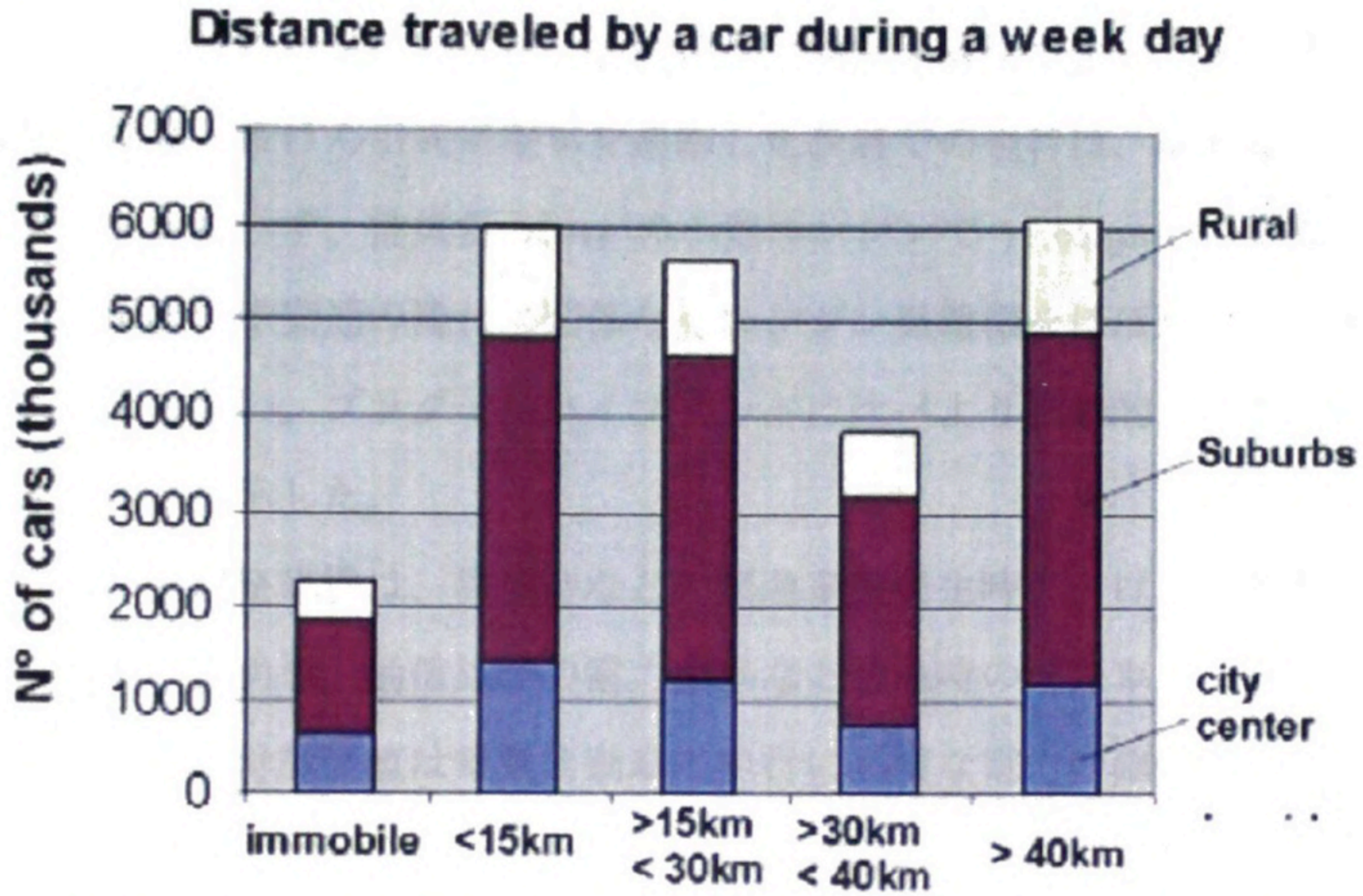


Fig.3-31 平日の自動車使用調査の結果[Adrianusほか(2006)]

Fig.3-32 は、自動車の種類別 CO₂ 排出量の比較である。PHEV10 は、10 マイル (約 16km) までは EV で走る。PHEV30 は、30 マイル (約 48km) までは EV で走る場合で比較してある。このデータからも電気自動車がいかに環境面で優れているか分かり、将来の地球環境において、電気自動車は不可欠であると言える。[Adrianusほか(2006)]

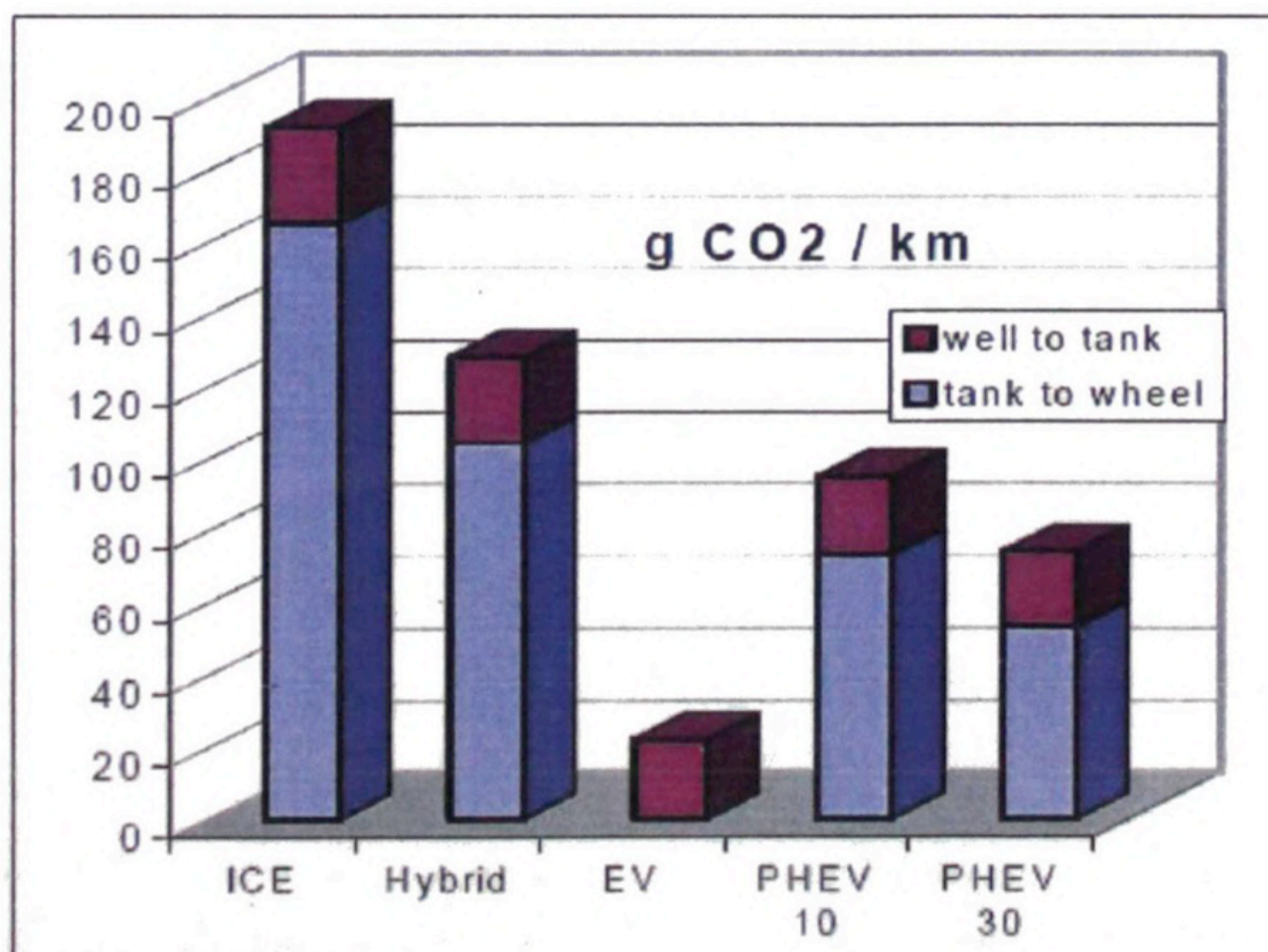


Fig.3-32 自動車種類別 CO₂ 排出量の比較[Adrianusほか(2006)]

7 結論と考察

本節では、この被けん引式発電車の設計内容をあきらかにし、けん引用電気自動車と共に用いたけん引式発電機によるレンジエクステンダーシステムによって、電気自動車が抱えるガソリンエンジン自動車に比べ短い航続距離の問題を解決できることを述べた。

けん引電気自動車と被けん引式発電車を連結した状態での走行は、総重量が 1900kg ほどに達したにもかかわらず、排気量 614cc の小型エンジンで 11.65km/l の燃費を記録できた。これは、道路状況や交通の流れに関係なくエンジン発電機をほぼ最大の効率点で運転できるからに外ならない。プラグインハイブリッドに比べより機動的かつ有効に電気自動車を活用できることを示した。

また、このけん引式発電機は、災害時などの緊急事態発生時に、けん引用電気自動車でけん引して被災地に出向き、通信施設の電力確保など緊急時の電源車としても重要な用途であり、その利用面での付加価値は電気自動車の走行に必要な電力の確保に留まらない。

将来電気自動車が増えた時のテーマとして、汎用性のあるけん引式発電機をグループや地域で共同保有するシステムの構築をすれば、レンジエクステンダー(RXT)システムを容易に安価に利用できる。

章 ニッケル系一次電池（オキシライド乾電池®）を動力源とした 目標時速 100km の小型電気自動車の動力設計

4-1 はじめに

電気自動車が高効率で走行できる乗物であることをアピールするために、乾電池を用いて人が乗り時速 100km/h で走行することが可能であることを実証するプロジェクトを行った。走行時の各種抵抗を減らし、搭載乾電池数や車両の形やパワートレインを最適化することにより、2007年8月4日、茨城県の日本自動車研究所 城里テストコースにおいて、最高時速 115.9km/h を達成した。本論文はこの研究プロジェクトにおける車両設計およびモータやタイヤ設計についてのべたものである。

地球温暖化の抑制策の一つとして、化石燃料をエネルギー源としない自動車の開発が、世界で活発におこなわれている。ただそれらの多くは、利便性や快適性など人々の要求を満たすために発達し、化石燃料をエネルギー源とする自動車の形態を、ほとんどそのまま受け継ぎ、その範疇を大きく越えるものでない。本プロジェクトは、視点を大きく変え、電気自動車をつかった場合は、市販乾電池をエネルギー源としても（電気自動車の高効率性ゆえに）100km/h まで達する速度で走行可能なほど高効率であることをアピールしようとするものである。具体的には使用乾電池として、最も高出力のニッケル系一次電池（以下、オキシライド乾電池®）を使用することにして、目標達成を可能とする設計開発を行ない、高速走行が可能な小型電気自動車を実現する。

人が始めて時速 100km/h を超えたのは、1899年4月29日に、ベルギー人の Camille Jenatzy 氏が、フランスの Achères において、時速 105.88km/h を記録したときである[佐藤(2002)]。その記録達成が電気自動車であったため、本プロジェクトでは【オキシライド乾電池®により時速 100km/h 達成】を目標に掲げるとともに、さらに【最高速度 105.88km/h を超える】を更なる目標とした。なお知る限りにおいて乾電池による高速走行のプロジェクトはない。

出力に制限のある乾電池を利用した小型電気自動車の開発には、高効率・低抵抗の動力系製作と電池出力の最大化が不可欠である。本論文では、動力系における設計と開発結果について述べる。オキシライド乾電池®の出力性能検討に関しては、第5章【ニッケル系一次電池（オキシライド乾電池®）を動力源とした 目標時速 100km/h の小型電気自動車用電源の最適化設計】[Ashida.T., S.Minami, (2007)] で述べる。動力系の設計にあたり、まず

に必要な車両の動力性能を算出し、それを達成すべく専用の小型電気自動車の仕定した。次にその仕様に沿った専用車体、モータと駆動系およびタイヤの開発を行った。

Fig.4-1 は走行テスト時に最高速度 115.9km/h を記録した様子を示す。

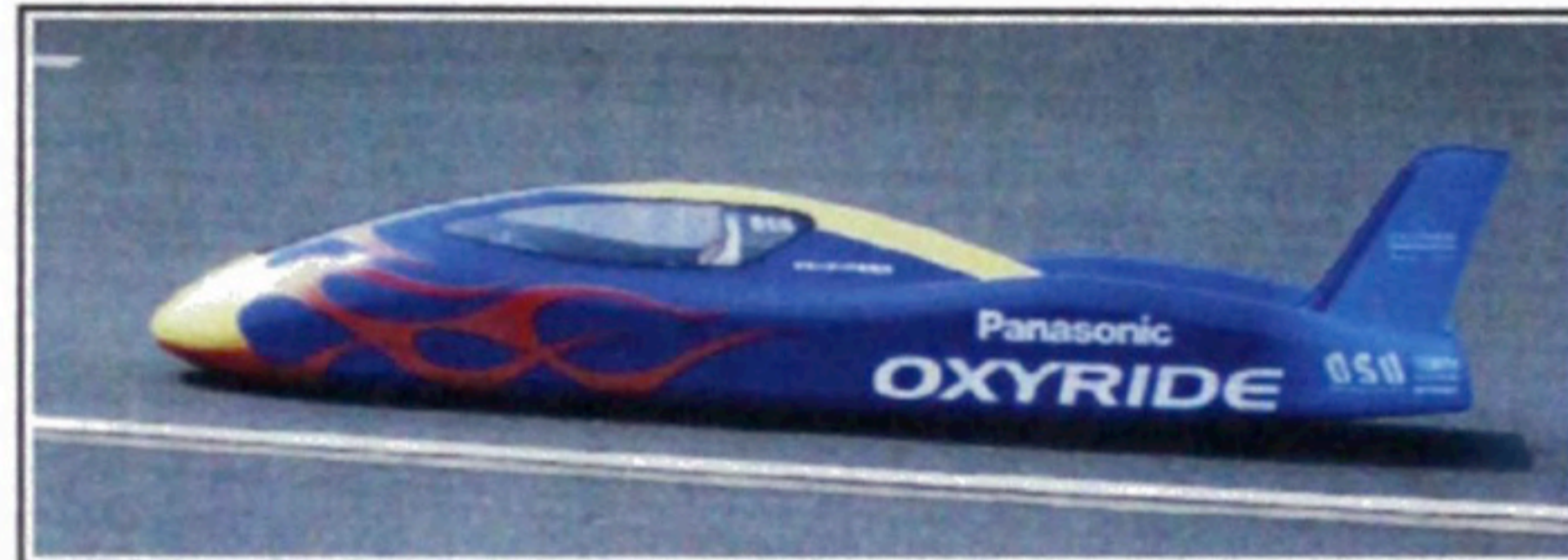


Fig.4-1 最高速度 115.9km/h を記録した走行テスト時の写真

4-2 車体の開発

小型電気自動車で時速 100km/h の目標を達成するために重要なことは、高効率・低抵抗の動力系の製作と電池出力の最大化である。性能面では〔軽量化〕、〔高効率化〕が重要であるが、それを踏まえたうえで同時に安全性が必要である。まとめると、高速走行可能な小型電気自動車の設計開発において解決すべきことは以下の各点である。

1. 空力性能に優れた軽量で高剛性の車体の開発
2. 軽量コンパクトで効率の良いモータおよび駆動系の開発
3. 転がり抵抗の少ない専用タイヤの開発
4. オキシライド乾電池[®]搭載本数の最適化

本論文では「1. 2. 3.」についてのみ述べる。「4.」については、第5章【ニッケル系一次電池（オキシライド乾電池[®]）を動力源とした 目標時速 100km/h の小型電気自動車用電源の最適化設計】[Ashida.T., S.Minami, (2007)] で述べる。

4-2-1 軽量かつ安全で性能の良い車体の開発

性能の良い車体の条件としては、各種の走行抵抗が少なく軽量で丈夫なことが求められる。車両の走行に関する各種の走行抵抗には〔空気抵抗〕〔転がり抵抗〕〔勾配抵抗〕〔加速抵抗〕が挙げられ、それぞれの項目について述べる。

空気抵抗 R_a は、 $R_a = \rho \lambda S v^2 / 2$ の式で表される。ここで ρ は空気密度、 λ は空気抵抗係数、 S は車両前面投影面積、 v は走行速度である[池上敦哉(2007)、木村英樹(2007)]。空気抵抗

の2乗に比例して増加するため、100km/hでは非常に大きな抵抗となり、空気抵抗目標達成の大きな要素となる。空気抵抗を低減する手段として『車両の前面投影の最小化』、『空気の流れ易い車体形状』、『車体後方の気流の乱れの抑制』などが掲げられる。現在の市販乗用車の空気抵抗係数は、0.25から0.3程度である。本プロジェクトの小型電気自動車ではその半分以下の0.13程度を目標として車体設計をおこなった。これは形状や寸法も近い高性能の省エネカーが0.11~0.12であるのを参考にした。

転がり抵抗 R_r は、 $R_r = W\mu$ の式で表される。ここで W は車両総重量、 μ は転がり抵抗係数である[池上敦哉(2007)、木村英樹(2007)]。転がり抵抗係数は、路面状況、タイヤの摩擦抵抗、各車輪荷重、車輪軸受けの状態などに大きく影響される。開発する車両においてはタイヤの転がり摩擦抵抗の低減、および車両総重量の低減が重要な要素となる。本プロジェクトでは人間の重量と車体の安全性を加味して、車両総重量を100kg以下にすることを目標とする。

勾配抵抗 R_e は、 $R_e = W\sin\theta$ の式で表される。ここで W は車両総重量、 θ は勾配である[池上敦哉(2007)、木村英樹(2007)]。開発する車両においては勾配のある坂路の走行を予定していないので、 $R_e = 0$ とする。

加速抵抗 R_c は、 $R_c = b(W + \Delta W)$ の式で表される。ここで b は加速度、 W は車両総重量、 ΔW は駆動部分中の回転部分の慣性相当重量である[池上敦哉(2007)、木村英樹(2007)]。開発する車両においては車両総重量の低減が重要な要素となるが、限られた時間・距離の内で100km/hを達成するためには、加速性能もまた重要項目である。加速抵抗は車両を運転する人の技量にも大きく影響を受ける。本論文では、スタートして走行速度が100km/hに達するまでを60秒間の等加速度を行なうとみなして評価を行なった。その根拠は、入力電力が一定で投入された時、一次近似として加速度が一定と考えられるからである。

4-2-2 軽量コンパクトで効率の良いモータおよび駆動系の開発

動力源のオキシライド乾電池[®]の特性および開発する車体の特性を生かすためには、確実な基本性能を持ち総合的効率の高いモータ、および駆動系の開発が不可欠である。その要求される性能を満たしたうえで、車体開発と同様モータおよび駆動系にも可能な限りの

量化が重要である。なお本プロジェクトでのモータ開発の目標として、広い電流範囲において 90%以上の効率を目指した。また、伝達ロスを最小にするため、ミッションギアやデフレンシャルギアおよびドライブトレインを持たない、両後輪に駆動モータ内蔵するインホイールモータを採用して設計することにした。

4-2-3 転がり抵抗の少ない専用タイヤの開発

上述のように、本プロジェクトにおいて転がり抵抗の低減も極めて大きな要素となる。よって転がり抵抗が少なく、耐パンク性を重視した専用タイヤを開発する。本プロジェクトでは標準的自転車タイヤに比べ 20%の軽量化を目標に安全なタイヤの開発を目指した。

4-2-4 安全性

開発する車両の克服すべき課題としては、空力性能と表現される空気抵抗の少ない車体形状、高効率のモータおよび駆動系、転がり抵抗の少ないタイヤ開発と軽量の車体の完成があげられる。と、同時に目標となる 100km/h の高速域で運転者の安全を守るために、高い車体剛性が必要である。全てにおいて安全性の確保と車体の軽量化という、相反する目標を両立させる設計を行なう必要がある。

4-3 車体の設計と製作

本章では、まず本プロジェクトの目標達成に必要な車両の性能を求め、それをもとに開発する車両の寸法形状などの仕様を決定する。その結果をもとに車体およびモータや駆動系の設計をおこなう。

4-3-1 車体計画・設計

Table.4-1 は目標とした車両の仕様である。この段階では、まだ駆動系伝達効率を 100%としている。モータの出力端にタイヤを取り付け直接駆動する Direct Drive 方式を採用することによる（詳細はモータの章で述べる）。また発表されたソーラーカーの研究結果から、後輪 2 輪のうちの片側 1 輪駆動より両輪駆動の方が、投入電力が少ない傾向にあるため後 2 輪駆動とした。[藤田ほか(2006)]

Table.4-1 目標とした車両仕様

電源電圧 (V)	24~48	走行速度 (km/h)	100
気温 (°C)	20	空気抵抗係数 (Cd)	0.13
空気密度 (kg/m ³)	1.25	車両前面投影面積: A (m ²)	0.34
モータ平均効率 (%)	91	車体寸法 (L - W - Hmm)	3300 - 780 - 510
駆動系伝達効率 (%)	100	車両重量 (kg)	45
車両総重量 (kg)	(1人乗車時) 100	タイヤ直径 (cm)	34.0
転がり抵抗係数 (μ)	0.002	モータおよび駆動輪	D-D モータ後2輪駆動

Table.4-2 は車両仕様をもとに算出した、車両へ働く各種の抵抗の値である。この表を見て分かるように、車両の総走行抵抗の内、加速抵抗と空気抵抗が支配的である。目標達成には高効率で出力に余裕のあるモータ、高速度走行域に於いて空気抵抗の少ない車体形状、転がり抵抗の少ないタイヤの開発が重要な要素である。なお本プロジェクトの実施では登坂路を用いないため、勾配抵抗は加味しない。

Table.4-2 Table.1 の仕様にもとづく車両へ加わる
各種抵抗および総走行抵抗 (時速 100km/h 時)

転がり抵抗 (N)	2.45
空気抵抗 (N)	21.32
加速抵抗 (N)	47.22
総走行抵抗 (N)	70.99

車体形状に関しては、イタリア、ベルトーネ社が 1994 年に発表した速度記録挑戦車 [BERTONE Z.E.R.]などを参考に、細く・低く・長く・スムーズな車体形状を採用した [EV world(1995)、Alberto Calliano (1995)]。航空機風の垂直尾翼も過去の多くの速度記録車に見られる特徴である。垂直尾翼は軽量な車両の高速走行時の直進性を高めるための重要な装備として、本プロジェクトでも採用した。

Fig.4-2 は目標として設定した車両仕様にもとづき、走行速度毎に必要な予想される電力である。速度上昇に比例して消費電力 (W) が増加することがわかる。(速度 100km/h ま

60秒の等加速度とした。)

Fig.4-3 は、Fig.4-2 で予想される必要電力から加速度成分を除いた特性である。目標速度達した後、その速度を維持して巡航する場合は、必要電力から加速度成分を除いた電力巡航時に必要となり、Fig.4-3 で予想される電力となる。図中の μ は転がり抵抗係数、 W は車両総重量、 ΔW は駆動部分中の回転部分の慣性相当重量、 A は車両前面投影面積、 Cd は空気抵抗係数、 ρ は空気密度、 η は駆動系伝達効率である。

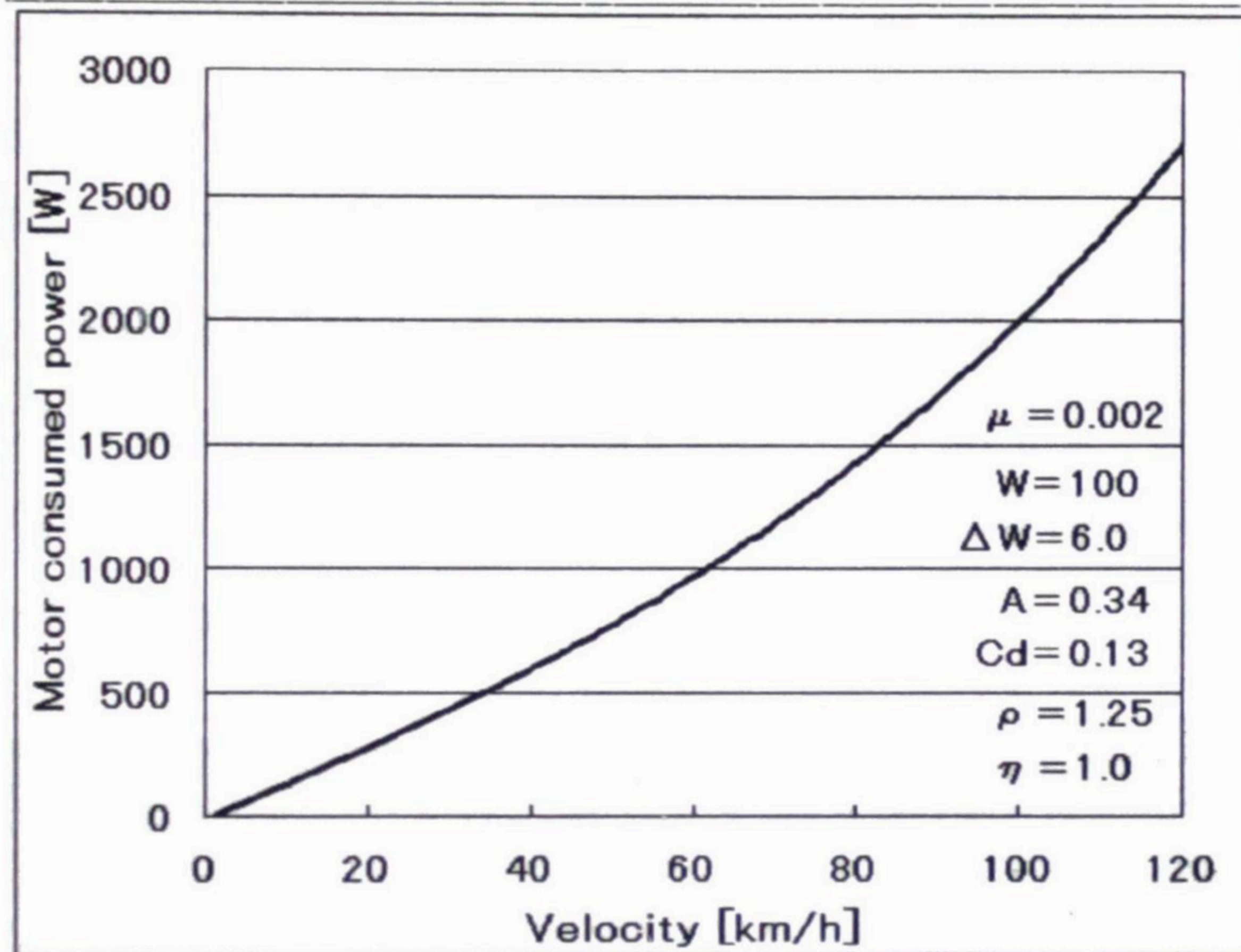


Fig.4-2 走行速度毎に必要な予想電力

※停止から一定加速で 100km/h に達するのに必要な速度毎の電力

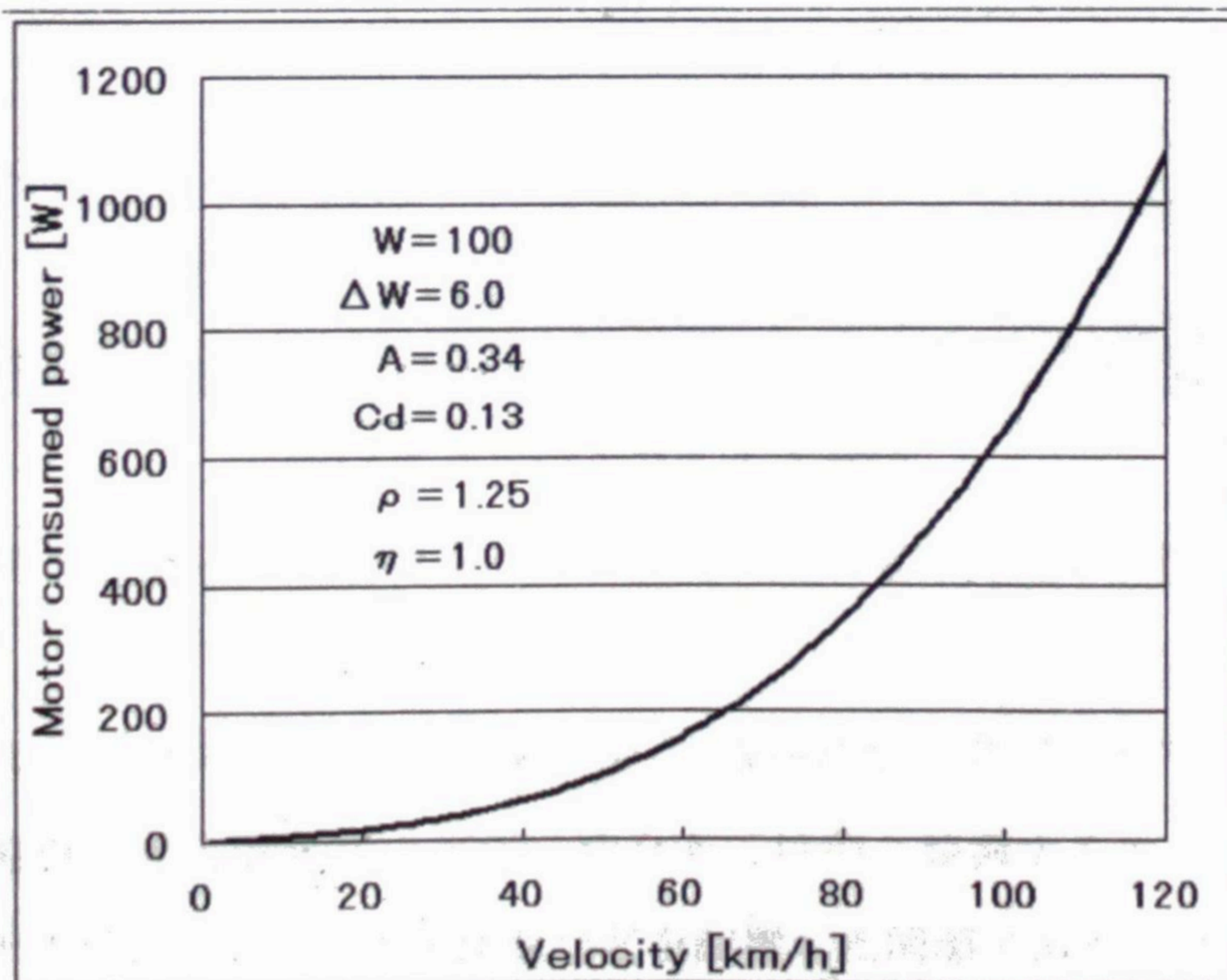


Fig.4-3 一定速度における必要な電力

Fig.4-4 に、車体形状検討のために試作した 1/4 スケールモデル 3 種類を示す。スケールモデル 3 種類を同時に製作し、最終形状決定までの時間短縮を図った。形状検討の結果、最終的に左端のスケールモデルの形状に決定した。この形状に決定するにあたり、このスケールモデル 3 種類を計測と経験と比較した。前面投影面積は何れのスケールモデルも 0.34 m^2 であった。また空気抵抗係数 C_d 値もおよそ 0.11 から 0.12 と同程度と想像できた。図中の左端のスケールモデルの形状に決定した理由は、丸みを帯びた先端形状である。この形は空気の流れがスムーズと言われる水の落下する水滴形状に近い、中央のスケールモデルは左端のスケールモデルに比べると少し角が膨らんだように見える。大阪産業大学ソーラーカープロジェクトでのソーラーカー製作時の、基礎風洞実験の結果によれば、このような形状の場合、先端左右に空気の剥離が発生するのが予測できる。右端のスケールモデルは平面的に見た先端の形状は左端のスケールモデルと似通っているが、車体と風防部分に切返し形状があり、この部分が車体表面の気流のスムーズな流れを阻害する。これらの検討結果から左端の車体形状に決定した。



Fig.4-4 スケールモデル 3 種類

※この角度から車体形状の優劣が見て取れる。検討の結果、左端の形状に決定した

Fig.4-5 は決定した車体寸法・装置配置図である。最終形状を決定したスケールモデルに、平均的日本人が着座できる運転席の車内寸法をあてはめ、装備するモータやコントローラ・駆動装置・サスペンション・操舵装置などを配置した図面である。フレームはカーボン繊維強化プラスチック（以下 CFRP）/アラミドハニカム/CFRP のサンドイッチパネル複

合材によるモノコック構造で、車体はCFRPとアラミドハニカムによる一体整形を用いた。ウインドスクリーンにはアクリル樹脂板の加熱整形を採用し、転倒時の運転者の頭部の安全を守るため、CFRP製のロールオーバーバーを備えることとした。

ブレーキ機構は、前輪制動は油圧式ディスクブレーキ。後輪の制動は、回生スイッチの動作によって駆動モータへの電力供給を止め、駆動モータを発電機として運動エネルギーを電源乾電池に戻す回生ブレーキとした。なおこの回生ブレーキは、前輪の油圧ブレーキを操作するブレーキレバーに組み込んだスイッチ機構によって作動し、前輪のブレーキ作動より先に回生スイッチが作動するシステムとした。なおスロットルに当たる出力ボリュームをOFFにすることで惰性走行ができる。

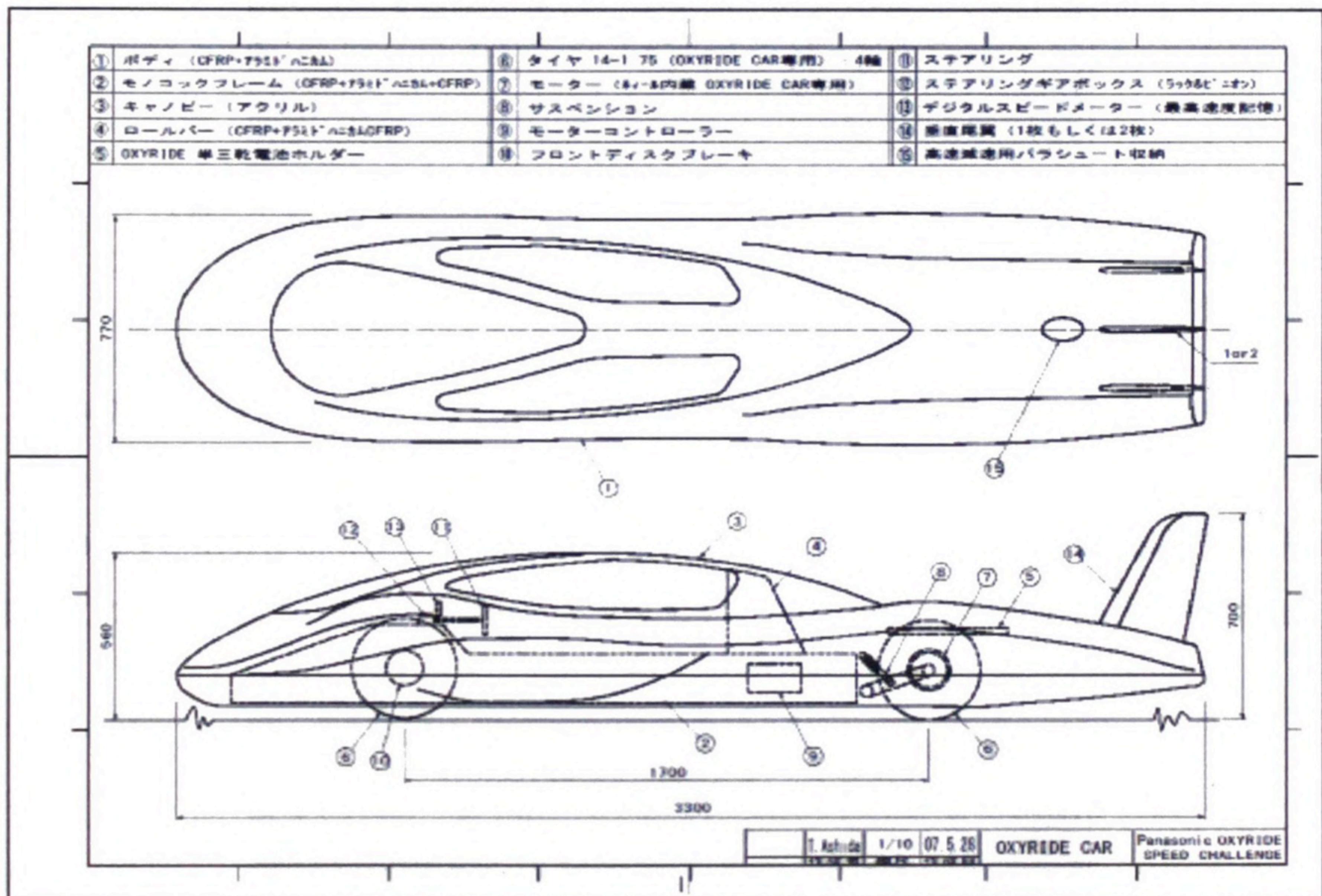


Fig.4-5 車体寸法・装置配置図

4-3-2 車体製作

4-3-2-1 マスターモデル製作

車体製作過程について述べる。Fig.4-6 に車体製作の第一段階である、マスターモデル製作過程の写真を示す。このマスターモデルの出来具合が完成車両の出来を左右する。1/4

ケールモデルや外形図をもとに、低発泡倍率の発泡スチロール樹脂を使用し、原寸大のマスターモデルを削りだした。表面の歪な箇所を細かく修正しながら空気の流れに淀みが生じないように注意しながら仕上げた。



Fig.4-6 低発泡倍率の発泡スチロール樹脂を削ったマスターモデル

※手前は黒く塗った1/4スケールモデル

Fig.4-7 に完成したマスターモデルを示す。低倍率発泡スチロール樹脂の表面強度を確保する目的で、表面をエポキシ樹脂で固め、その表面を更に研磨して滑らかにし、表面の凹凸や抑揚など不具合箇所を、パテ修正および研磨仕上げをして完成した。表面は周囲が写るほどに磨いた。この段階で垂直尾翼はまだない。周囲は補強用アルミ角パイプである



Fig.4-7 表面を樹脂で固め研磨して完成した1/1マスターモデル

4-3-2-2 雌型製作

Fig.4-8 はマスターモデルに離型処理後、ガラス繊維強化プラスチック (FRP) を塗り重ねて完成した、車体上部の雌型の写真である。マスターモデルを雄雌反転させた状態になる。これと同様の手順で車体下部の雌型も製作した。



Fig.4-8 完成した車体上部雌型

4-3-2-3 車体成型

Fig.4-9 はカーボンプリプレグおよびアラミドハニカムコアを積層後、加熱硬化させて完成した、CFRP 製の車体上部の写真である。同様の手順で車体下部も成型した。



Fig.4-9 完成した CFRP 製車体上部

Fig.4-10 は完成した車体下部に車体上部を乗せ、車体の周囲および各部の建付け状態を確認した写真である。

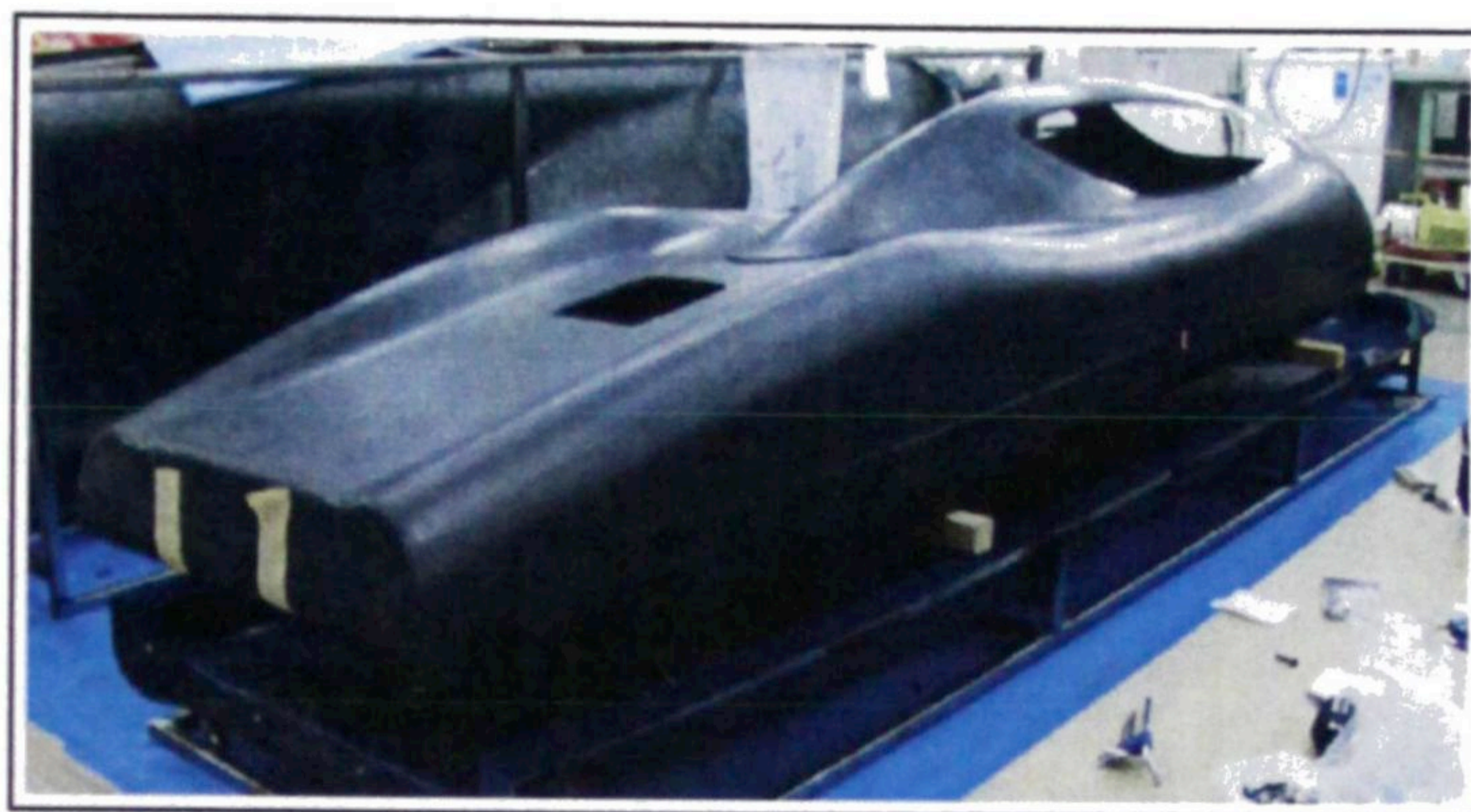


Fig.4-10 CFRP 製の車体下部と車体上部

※後部の四角い穴は、電池の搭載状態を見る覗き窓

4-3-2-4 組み立て

Fig.4-11 は組み立て前に各制作部品を集め、部品同士の干渉や組み立てに支障ないか最終的な確認を実施したときの写真である。その後車体に各部品を組み付け車両が完成した。



Fig.4-11 組み立て前の各制作部品

※車体下部の中は接着組立て前の CFRP/アラミドハニカムを繋ぎ合わせたフレーム

4-3-2-5 試運転

Fig.4-12 は完成車両の試運転の写真である。車両の組立て後、最終塗装仕上げ前に試運転を行ない不具合箇所が無い事を確認した。最終的に D-D (Direct Drive) 方式モータの採

などにより車体重量は 38kg となり、走行時ドライバー体重 50kg を加えて車両総重量は であることがわかった。これは初期の車体設計時より 12kg の軽量化を達成した。こ は約 8% のエネルギー節約となる。



Fig.4-12 車両試運転の様子

4-4 モーターの設計と製作

4-3-1.で検討した走行時必要電力の予測をもとにモーターの設計を行なった。すなわち車両設計段階で決定した車両仕様 (Table4-1) にもとづき転がり抵抗・空気抵抗・加速抵抗の総走行抵抗 (Table4-2) を算出し、その値をもとに作成した Fig.4-2 「走行速度による必要電力」のグラフから、静止から時速 100km/h までに必要な平均およびピーク電力を求め、それをモーター要求性能とした (Table4-3)。なおモーター回転数は、時速 100km/h 時のタイヤ回転数から求めた。

Table 4-3 車両仕様に基づくモーター要求性能 (時速 100km/h 時)

		モーター効率補正後
モーター回転数 (rpm)	1560	—
モーター出力 (W)	2024	2200
電源電圧 (V)	48	—
消費電流 (A)	42.17	45.83

に、実際に開発するモータに必要な性能と電池出力性能を示す。車両仕様からしたTable 3に比べ多少の余裕を見込んだ仕様となっている。この開発するモータに必要な性能の決定には、エネルギー源であるオキシライド乾電池®の特性に関するカタログデータを根拠にして求めたパラメータを用いた。表中の電源電圧を48V (Table4-3) から25V)に変更したのは、負荷時の電圧降下(負荷時垂下特性)を想定したためである。本プロジェクトの目標は1kmの計測区間を平均速度100 km/hで走行することであり、100km/hに達した段階においての計測区間では加速の必要はなくても速度維持が必要である。その電源となる電池は電力消費により内部抵抗が増加し、電圧降下が大きくなった後も速度が維持される必要がある。出力の限られた市販乾電池を用いて100km/hを越える速度まで加速し、その速度を維持するため、電圧、電流、速度が大きく変化する状況において、限られた距離でエネルギーを最大限に使いきるモータを開発することが重要課題である。なお、向かい風の条件も考慮し実際には100km/h以上出るよう、より大きい出力のモータの仕様を策定した。目的とする速度に対し、モータ回転数が適切な値になるようにトルクを決めることも重要である。また、駆動力伝達ロスをも最小とするため、両後輪に駆動モータを内蔵することとした。これらの仕様に従いモータを製作した。

Table4-4 開発するモータの目標性能と電池出力の要求性能

	車両全体のモータ性能	モータ 1 台当り性能
モータ回転数 (rpm)	1700	1700
モータトルク (kg・cm)	60.0	30.0
モータ出力 (W)	2200	1100
電源電圧 (V)	25	25
消費電流 (A)	88	44
電池出力持続時間 (S)	120	120

Table4-5 は最終決定したモータ仕様である。必要なモータおよび伝達系の仕様として90%以上の総合効率を満たすことを求めた。そのために減速ロス・駆動ロスを無くすため

に有効な、D-D (Direct Drive) 方式を採用したことが、システムの構造的長である。D-D 方式は一般的な駆動系における、モータ → 減速機 → 駆動装置 → タイヤというエネルギー伝達ロスをも最小とするための構造である。モータシャフトに直接タイヤを取り付け駆動することで、モータ効率がそのまま全駆動系の伝達効率となるので、モータ効率を含め総合効率 90%以上の高効率のシステムを目指すことが可能である。

Table4-5 最終決定したモータの仕様

モータ仕様	
システム電圧	20V ~ 40V
型式	M1048R 改
外観寸法	φ135mm×L100mm
重量	2.5kg
形式・駆動方式	DC ブラシレスモータ・インホイール D-D
最大出力	約 2kW
最高効率	90%以上
定格負荷回転数	1700rpm
回転方向	CW (時計方向)・CCW (反時計方向)
台数	CW 1台・CCW 1台 : 計2台

Table4-6 は完成したモータの詳細な製作仕様である。コア材料の 6.5%Si 鋼 [20HF1300] は通称「スーパーHF コア®」と呼ばれるものである。このコア材料は珪素が 6.5%含まれ従来の 3%Si 鋼にくらべ鉄損が約 1/2 と言われている[日本磁性材(参照 2007-5)]。

Table4-6 モータの製作仕様詳細

項目	仕様	備考
極数	16	
スロット数	24	
巻線	$\phi 1.1 \times 25T \times 2$ 直 $\times 4$ 並列(Υ 結線)	30V-1kW 入力時 コイル電流密度: 約 $6.1A/mm^2$
コア材料	6.5%Si 鋼	スーパーHF コア(20HF1300)
磁石種類	ネオジムマグネット	HS-25EV

加速時の負荷電流により絶えず変動する電源電圧でもスムーズな加速を可能にするため、電源電圧の変化に対応するモータおよびコントローラが必要である。電圧降下に応じて段階的に通電角を進め弱め界磁することで、電圧が低下してもモータ回転速度を上昇させて、更に加速できる仕様にした。その効果は試運転により確かめられた (Fig.4-22) (Fig.4-24)。

これらを考慮した結果、最終決定したコントローラの仕様を Table4-7 に示す。Fig.4-13 にコントローラのブロック図を示す。このコントローラの特徴は、速度制御の手段として従来の PWM 方式に加え手動 16 段の電子進角を備えたことである。通常の DC ブラシレスモータの場合、通電タイミングは固定か、用途により速度制御が必要な場合はベクトル制御の弱め界磁が一般的である。このコントローラでは、訓練したドライバーが電圧降下による加速の鈍りを体感的に感じ、進角スイッチを操作して進角を進める。進め過ぎた場合に進角を戻すスイッチも備えた。進角は 1 段で電気角 2 度ずつ進角し最終的に 16 段で、最大電気角 30 度の進角調整が可能である。これにより効率特性を犠牲にすることなく、モータのトルク・回転数特性 (T-N 特性) を変えることが可能となり、オキシライド乾電池[®]の電圧降下 (負荷時垂下特性) による速度低下を抑える有効な手段となる。

また後輪の D-D モータ化に伴い、(構造的スペースの関係から) D-D モータを付けた後輪は、構造的スペースの関係から機械式ブレーキの装着が困難なため、昇圧回生機能を採用し後輪のブレーキシステムとした。この回生制動の効果は試運転で確かめられた。Fig.4-20、Fig.4-22 では、回生制動によりバッテリー電圧が上昇したことが分かる。加速時の

降下（最低時約 20V）および減速時の昇圧回生（最高時約 58V）による入力電圧の変に対応するため、コントローラの入力電圧範囲を 18~63V とした。Fig.4-14 は車輪の内にモータを配置した状態を示す構造図である。

Table4-7 最終決定したコントローラの仕様

コントローラ仕様	
型式	M0548C
外観寸法	W130mm×D147mm×H58mm
重量	0.9kg
冷却方式	自然空冷
定格入力電圧	24V
入力電圧	18~63V
駆動方式	120 度矩形波通電
回生機能	昇圧回生機能（ON/OFF 操作スイッチ付）
制御方式	
速度（出力）制御	PWM+電子進角 16 段（最大進角+30°）

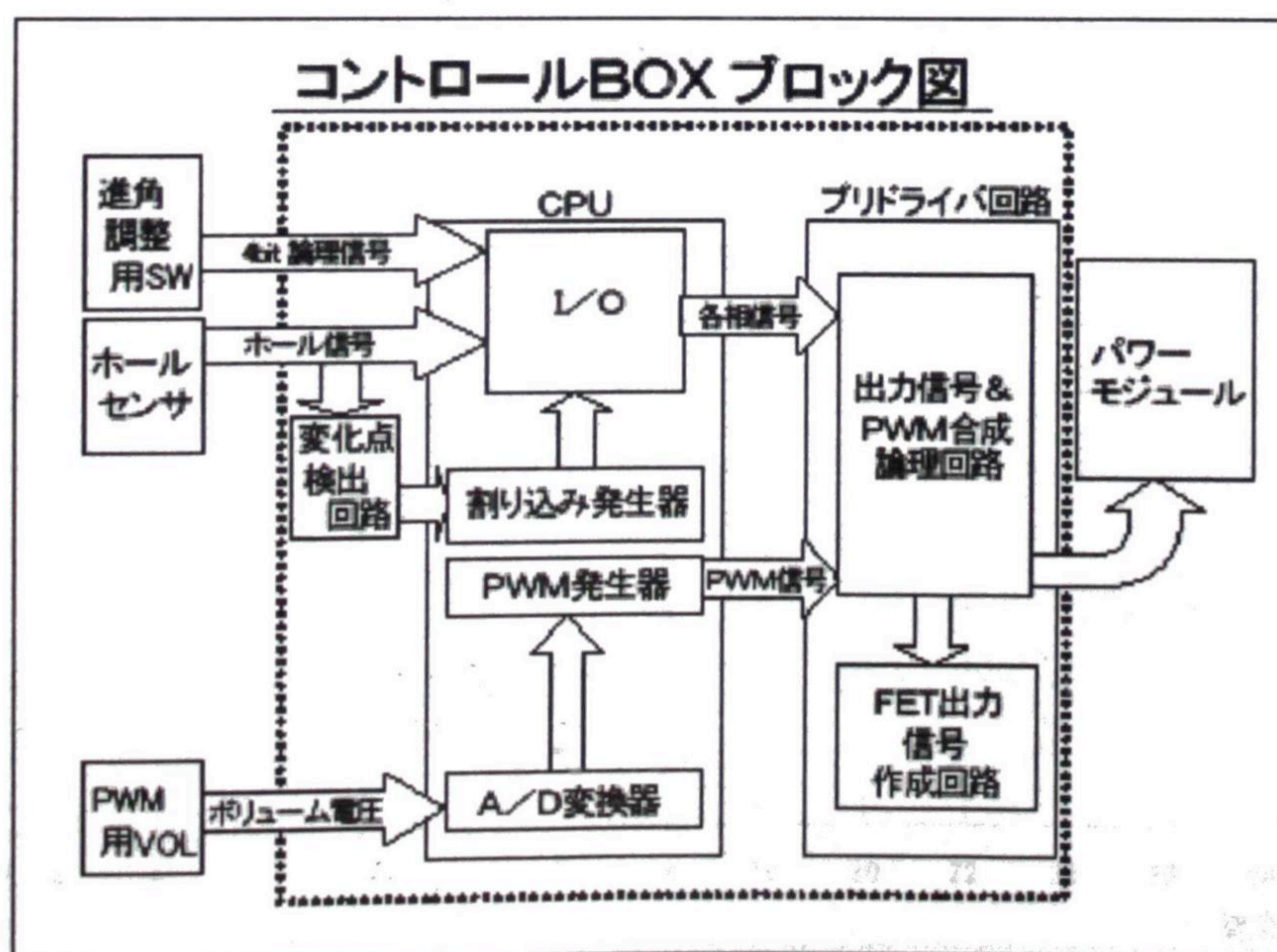


Fig.4-13 コントローラブロック図

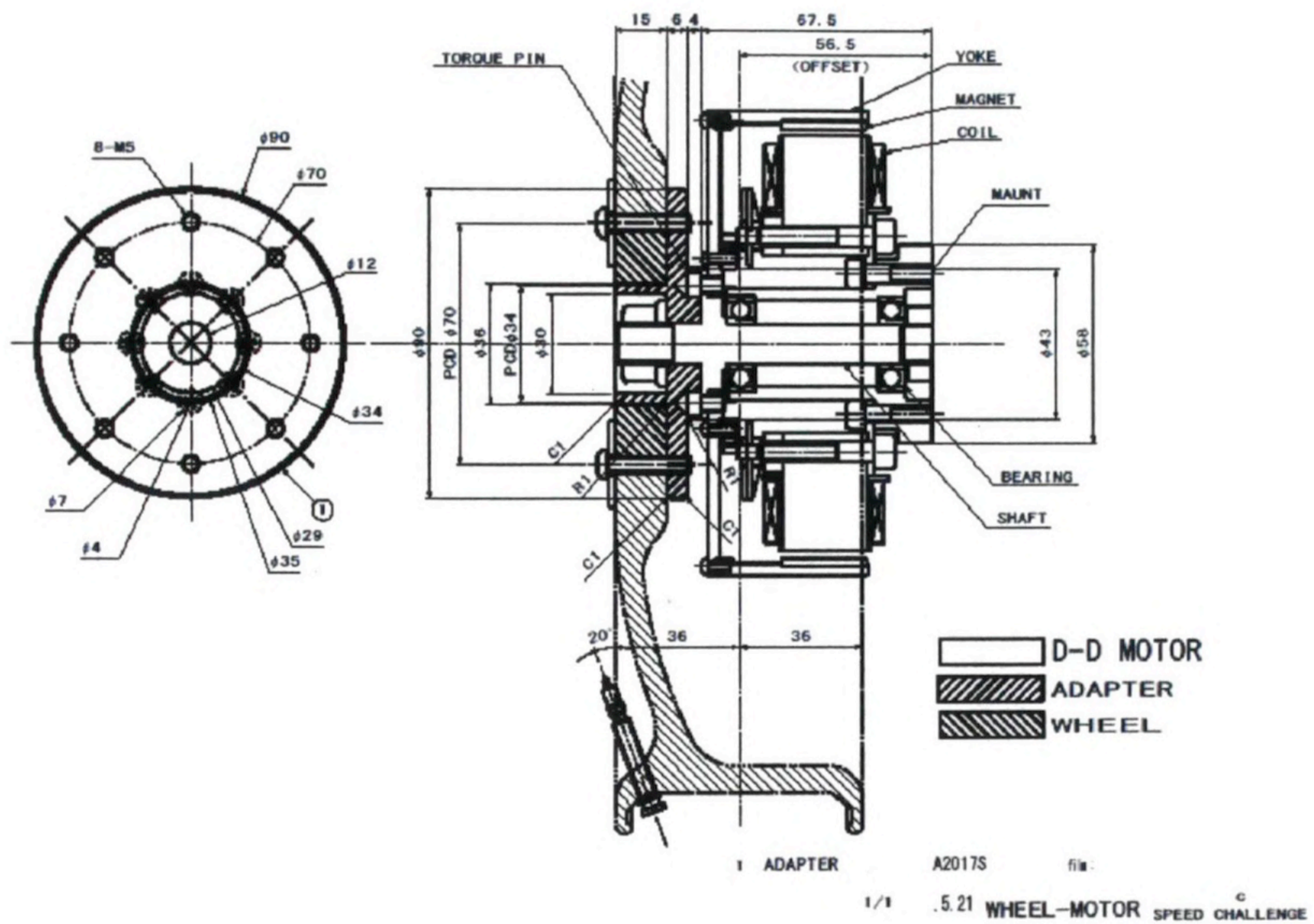


Fig.4-14 車輪の内側にモータを配置した状態を示す構造図

Fig.4-15、Fig.4-16 は、実験により得られたコントローラ入力電圧 DC24V、DC48V 時のモータ特性である。広い電流範囲で 90%以上の効率を維持していることが確かめられた。

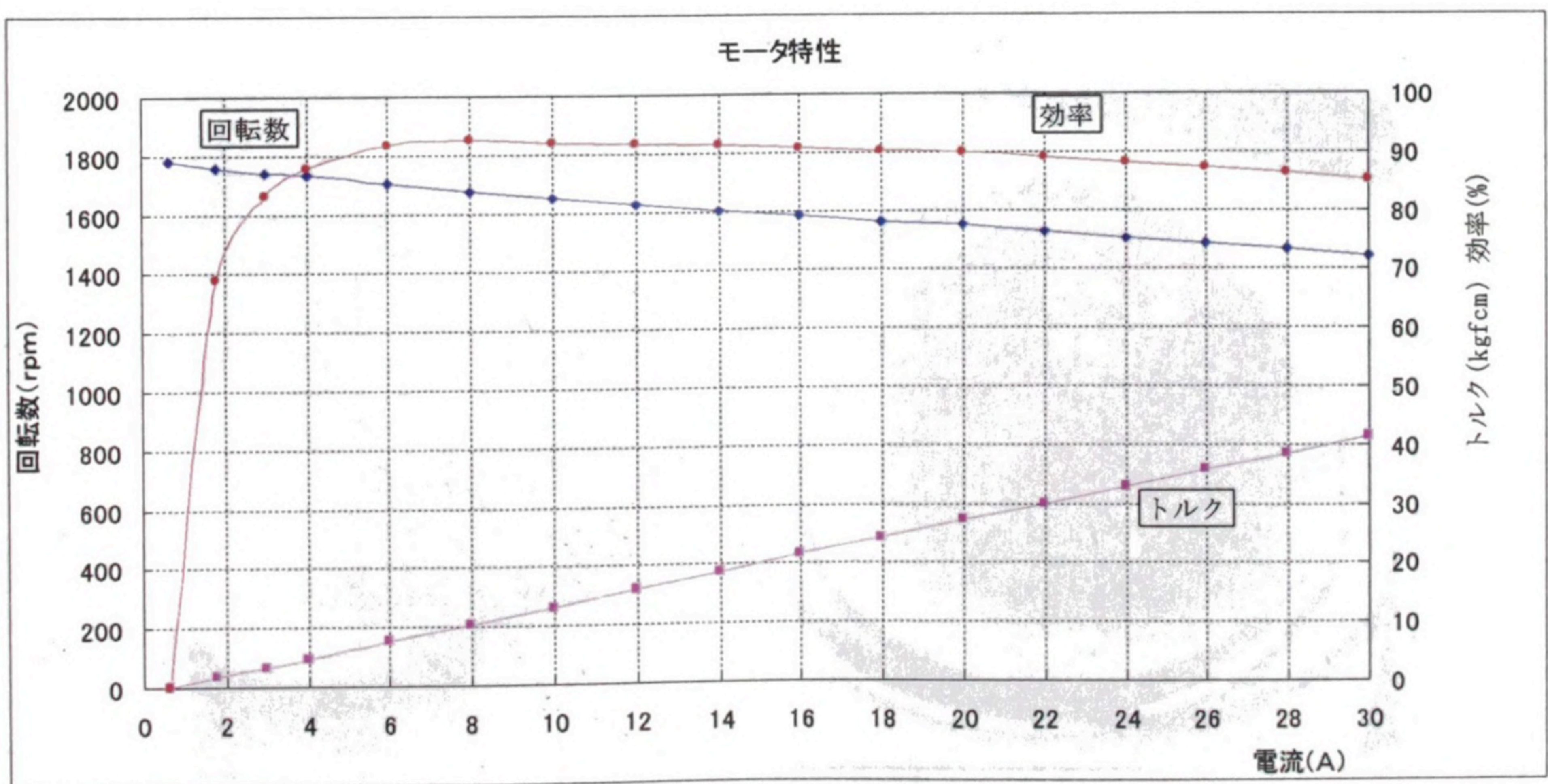


Fig.4-15 モータ特性 (入力電圧 24V 時)

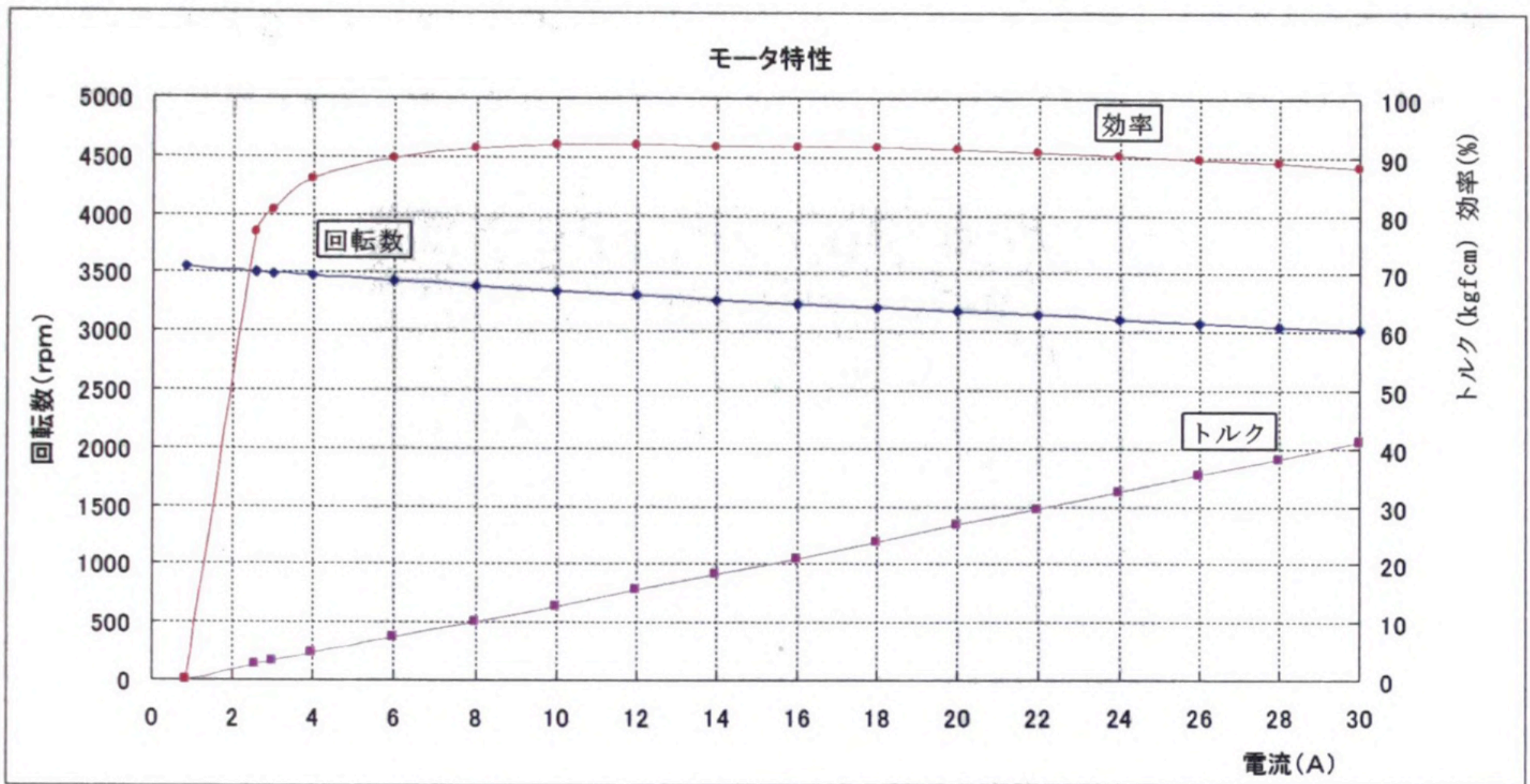


Fig.4-16 モータ特性 (入力電圧 48V 時)

Fig.4-17 は完成した D-D モータ (左・右用) の写真である。左は左用モータを裏側から見た状態である。右は右用モータを外側から見た状態である。この D-D モータは通常の一般的なモータと異なり、コイル部分のステータをサスペンションに固定、内側に磁石を付けた外側のロータ部が回転する。写真右側のモータでは、シャフトと周りのロータ (端面が赤色) が一体で回転する。写真左側の中央金属具分とコイルをサスペンションに固定。



Fig.4-17 完成した D-D モータ (左・右用)

Fig.4-18 は D-D モータ（右用）を、サスペンションのスイングアームを介して車体に取り付けた状態を示す。構造を見えやすくするため、タイヤおよびホイールは外してある。

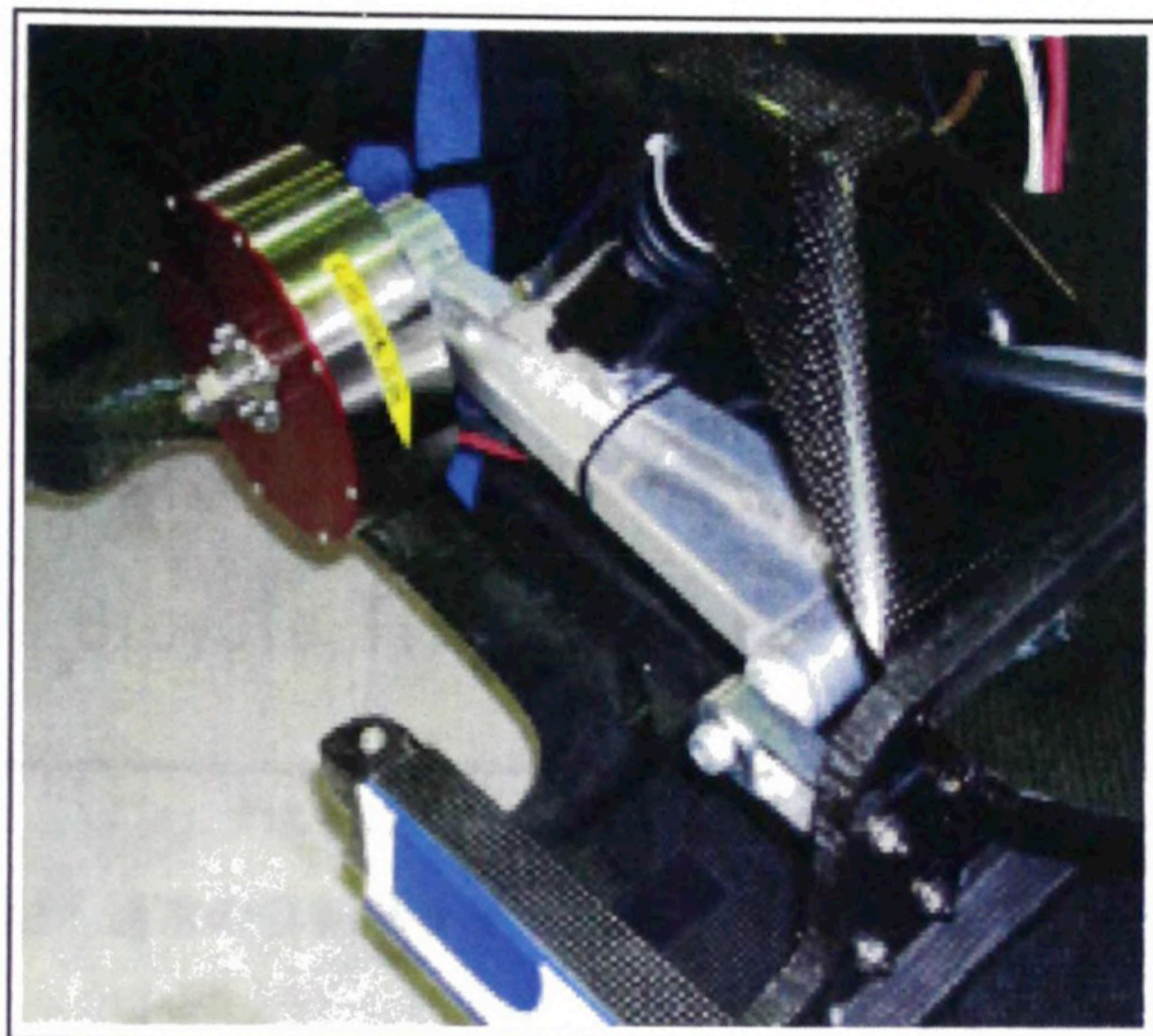


Fig.4-18 車体に取り付けた D-D モータ（右後輪用）

4-5. 専用タイヤ開発

4-5-1. タイヤ開発

本プロジェクトにおいて転がり抵抗の低減は極めて大きな要素である。そのためエコラン競技用タイヤや自転車競技用タイヤの経験をもとに、耐パンク性を重視した専用タイヤの開発をおこなった。タイヤの開発において目標としたのは、耐パンク性をエコランタイヤの2倍以上、同サイズの自転車タイヤに比べ20%の軽量化と同サイズの自転車タイヤに比べ転がり抵抗50%削減を目指した。

従来の自転車用タイヤの構造は、Fig.4-19の左図に示すように、1枚のタイヤコードで両ビート部を巻き込み中央のトレッド部で重ねる3プライ構造であるが、タイヤコードのプライス数が多いとヒステリシスロス（変形損失摩擦）が多いため、本プロジェクトで開発したタイヤは、Fig.4-19の右図に示すように、タイヤコードを2枚に分け、各々が両ビートを巻き込みトレッド部のタイヤコードを2プライ、ビート部4プライとなる構造として完成させた。実験により本プロジェクトで開発したタイヤは、自転車用タイヤに比べエネルギー消費が約50%であることが確認できた（Table4-9）。この消費電力の減少はヒステリシスロスの低減によるものである。また耐パンク性能向上のため、トレッドゴムの厚さを、

エコラン競技用タイヤの約1mmに対し、トレッドゴムの厚さを3mmとして、厚さに比例する耐パンク性能を約3倍に高めたそのうえで、重量の増加を最小に抑えることができた。

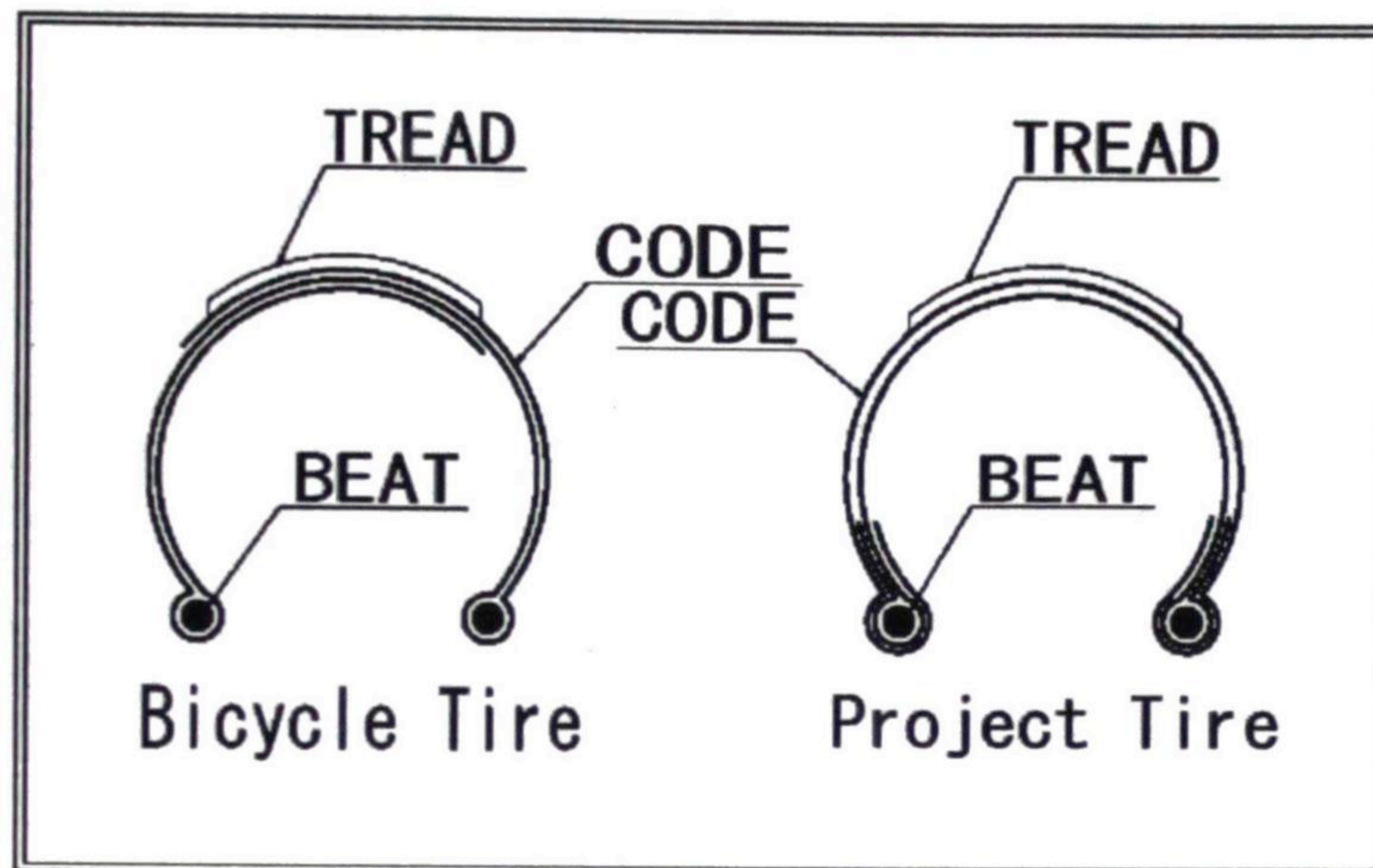


Fig.4-19 タイヤ断面構造比較図

(左：通常の自転車タイヤ 右：開発した専用タイヤ)

Table4-8 は完成した専用タイヤの諸元表である。専用タイヤは自転車タイヤの基準をもとに開発したため、自転車タイヤの規格にもとづき、寸法単位はインチ表示である。

トレッドゴムはシリカ配合の天然ゴム、両側のビートは強度を重視しワイヤービート、チューブは軽量で反発弾性に優れた厚さ0.7mmのウレタンチューブを製作した。

Table4-8 専用タイヤの諸元表

タイヤ呼称	14 - 1.75sd4
タイヤ外径 (インチ)	14
タイヤ幅 (インチ)	1.75
トレッド部厚さ (mm)	3 (トレッド 2.5+コード 0.5)
プライ数 (PLY)	Tread : 2 、 Hooked Edge : 4
推奨空気圧 (kPa)	500
チューブ材質	ウレタン樹脂
バルブ形式	Presta valve
タイヤ完成重量 (g)	157
ウレタンチューブ重量 (g)	90
推奨リム幅 (mm)	55

4-5-2 結果

Fig.4-20 は完成した専用タイヤ 14-1.75sd4 を、車両に装着した状態の写真である。Fig.4-21 は製作したタイヤ転がり抵抗試験機による、消費エネルギー測定の様子の写真である。

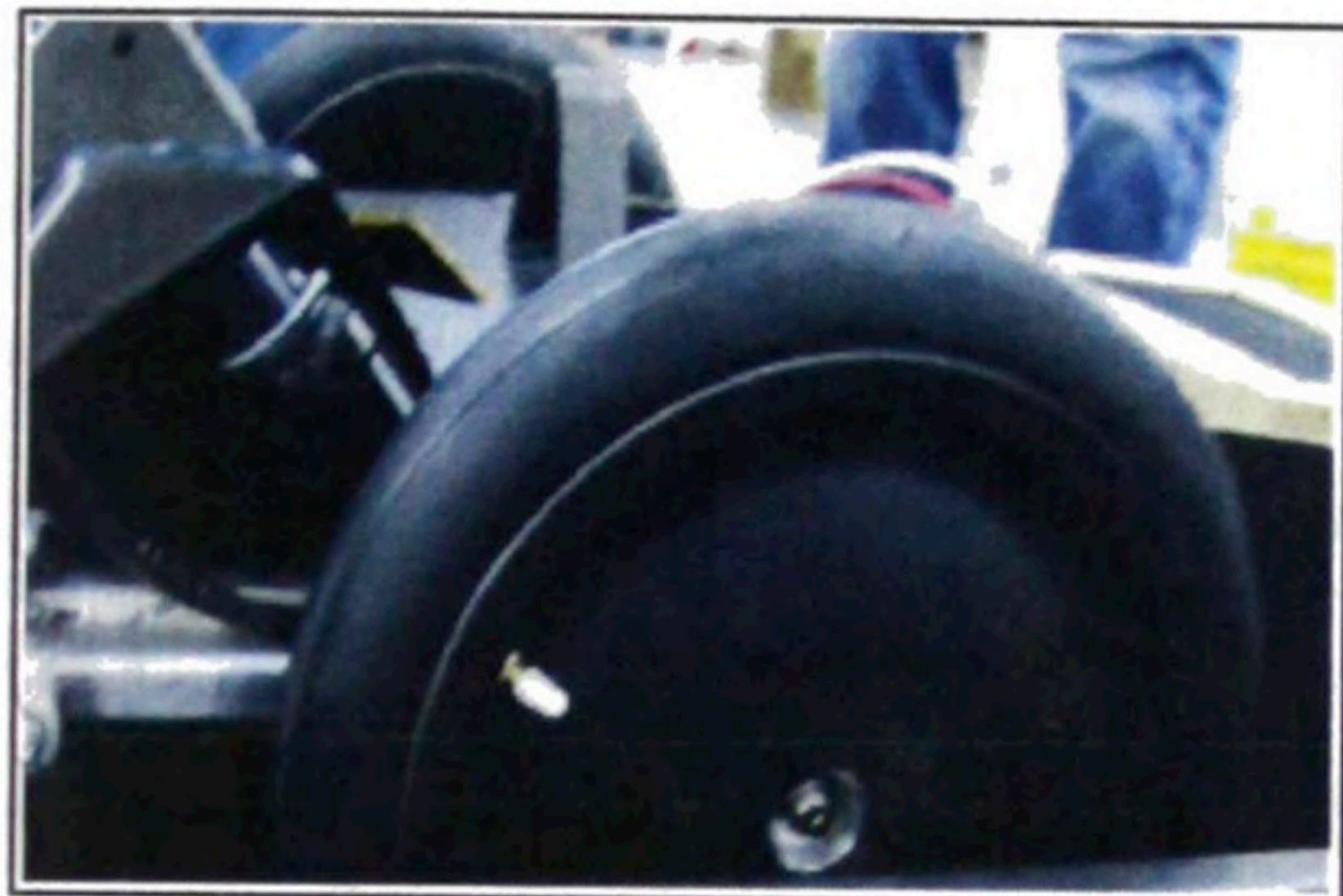


Fig.4-20 14-1.75sd4 タイヤ



Fig.4-21 製作した専用タイヤの消費エネルギー測定の様子の写真

Table4-9 はタイヤ転がり抵抗試験機による、消費エネルギーの測定結果である。表のように 14-1.75sd4 専用タイヤは、荷重:35kgf、走行速度 15 km/h 時の消費電力 10.47W、25 km/h 時の消費電力 19.00W、35 km/h 時の消費電力 29.49W と、耐パンク性を高めたにも係わらず、参考比較した同サイズの自転車タイヤに比べ各試験速度域において消費電力が約 50% 減となり、消費エネルギーの少ないタイヤであることがわかった。

これはトレッド部のタイヤコードの 2 プライ化によるヒステリシスロス(変形損失摩擦)の減少と、タイヤおよびウレタンチューブの合計重量 247 g と軽量化できた結果である。

Table4-9 タイヤ消費エネルギー比較結果

		タイヤ空気圧：500kPa			試験荷重：35kgf			
	速度	電圧	14 - 1.75sd4 試作タイヤ		14 - 1.75sd4 専用タイヤ		参考：自転車タイヤ	
			電流	消費電力	電流	消費電力	電流	消費電力
1	15 km/h	6.5V	1.66A	10.79W	1.61A	10.47W	3.28A	21.32W
2	25km/h	10.8V	1.85A	19.01W	1.76A	19.00W	3.58A	38.66W
3	35km/h	15.2V	2.05A	31.16W	1.94A	29.49W	3.80A	57.76W

4-6 走行試験

完成した車両の能力を確かめ、目標とする速度記録達成の基礎データとするため、旧白

浜空港の滑走路を使って走行試験を実施した。但し走行テストに使用した滑走路では長さが足りず、規定された測定方法である『1kmの計測区間を1時間以内に往復した平均速度』を試すことができないため、車両の性能を確かめるにとどまった。

Fig.4-22 は旧白浜空港での走行テストにおける電圧・電流・速度などのデータである。100km/h まで加速して一定速で走行するには旧空港の滑走路では短いため、最高速度が100km/h を超えることを確認し減速した。最初想定したとおり、約60秒間で時速100km/h に達する加速が行われたことがわかる。グラフの60秒付近からの減速域において、電圧が上昇し、電流方向が逆転しており、車速の低下から昇圧の回生制動が効果的に働いたことが分かる。このデータで100km/h を越えている時間は約5秒間、出力電力は最大2374W を記録し、1300W 以上の出力を45秒間維持した後の出力電力が1500W を超えているため、1kmの計測区間で平均時速100km/h を維持できることを確認した。出力が一定である加速が望ましいが、グラフ中のスタート直後に、消費電力2374W・電流80A 近くまで上昇しているが、これはドライバーが出力ボリュームの操作に不慣れで発生したのが原因である。

当初電池は、電力消費により内部抵抗が増加し電圧降下が大きくなると考えたが、電圧降下が著しくないのは、高負荷放電による電池の発熱で内部抵抗が減少し、電圧降下が抑制されたと考察できる。

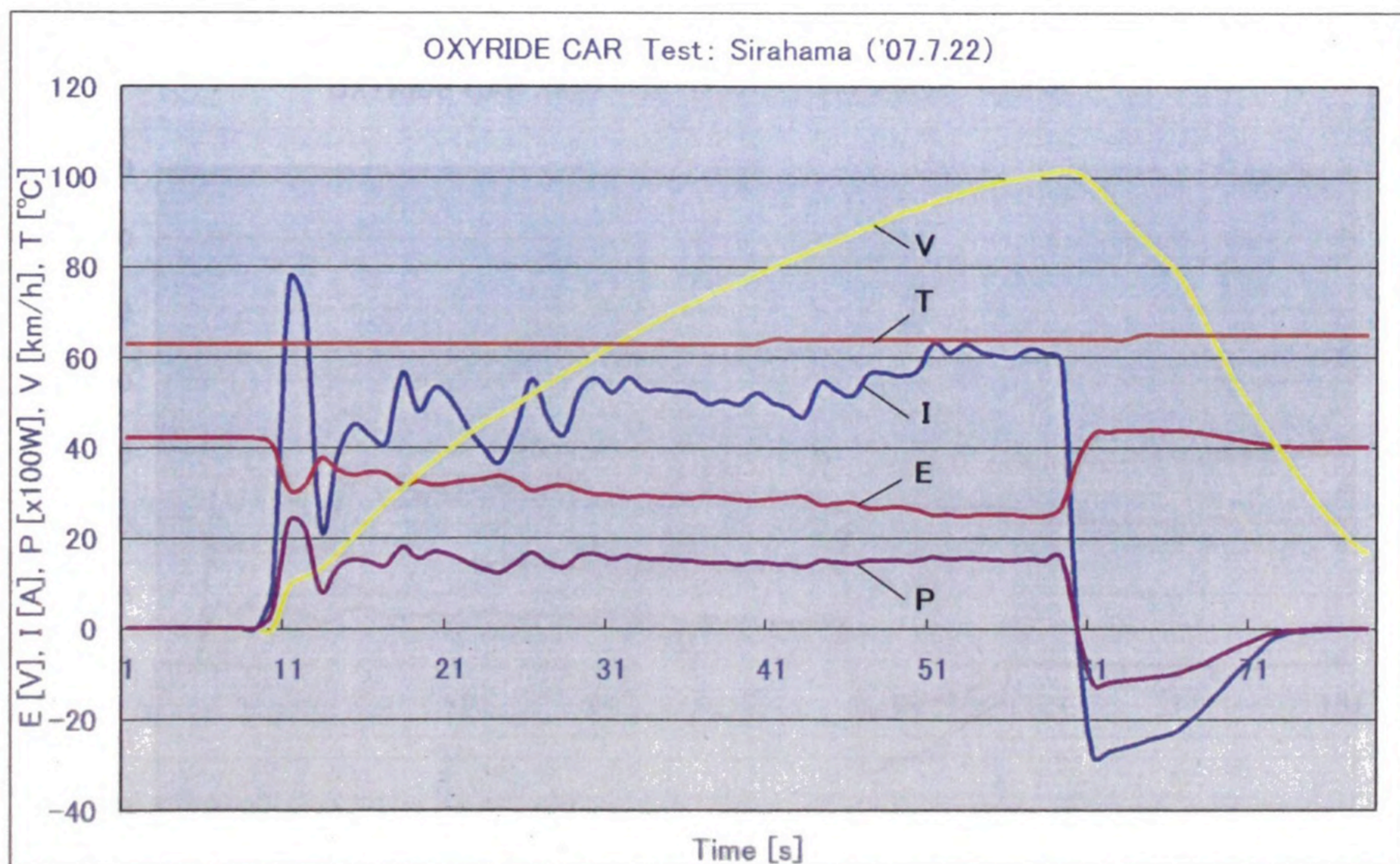


Fig.4-22 旧白浜空港での走行テストデータ

Fig.4-23 に走行テストの様子を示す。空力性能検証のため車体後部に糸をつけて走行し、の流れを可視化して確認した。糸の先端が大きく乱れるなど空気の剥離や乱流は見られず空力特性が良好であることがわかった。

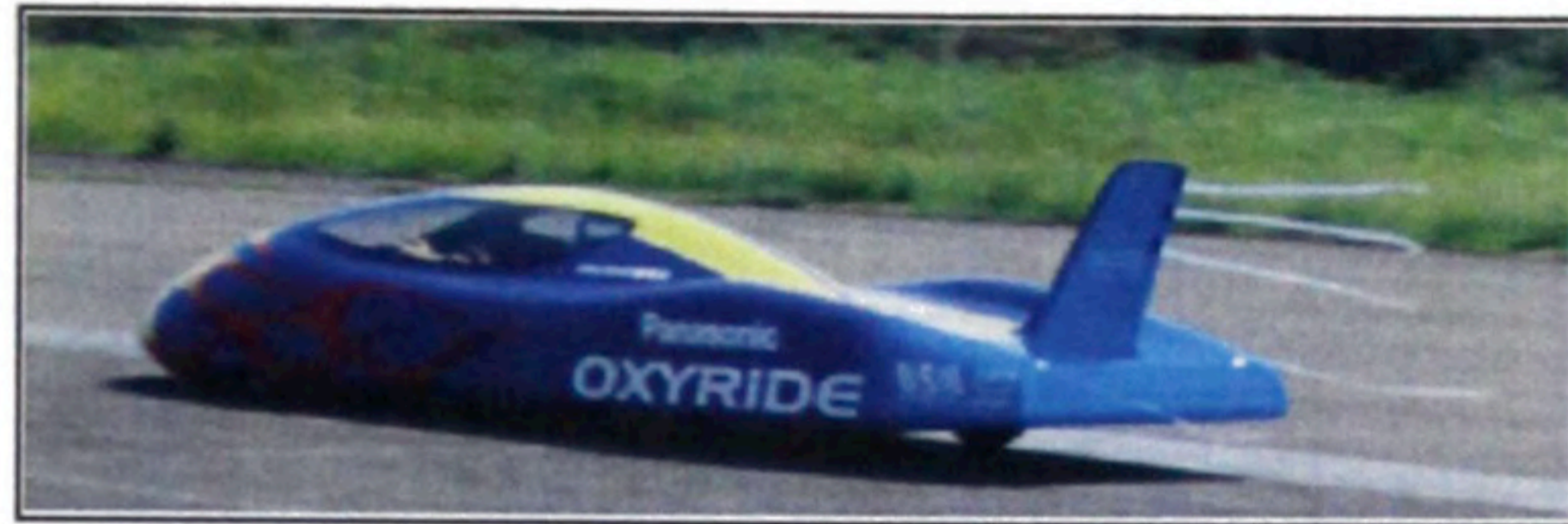


Fig.4-23 旧白浜空港 走行テストの様子

Fig.4-24 は目標とする速度記録走行会の会場である、財団法人 日本自動車研究所 城里テストコース（茨城県水戸市）において、記録走行会当日の早朝、走行テストした際のデータである。目標とする平均時速 100km/h 達成には、1km の計測区間を 36 秒以下で通過しなければならない。そのため走行テストでは 100km/h 到達後、その速度を 40 秒持続することを目標とした。その結果 100km/h 以上の速度を 41 秒間持続した後もオキシライド乾電池[®]は 1100W 以上の出力が可能であることが確認できた。この走行テストでの最大出力は 1770W を記録し、その後 1200W 以上の出力を 80 秒間維持して、最高速度 115.9km/h に達したことが分かる。

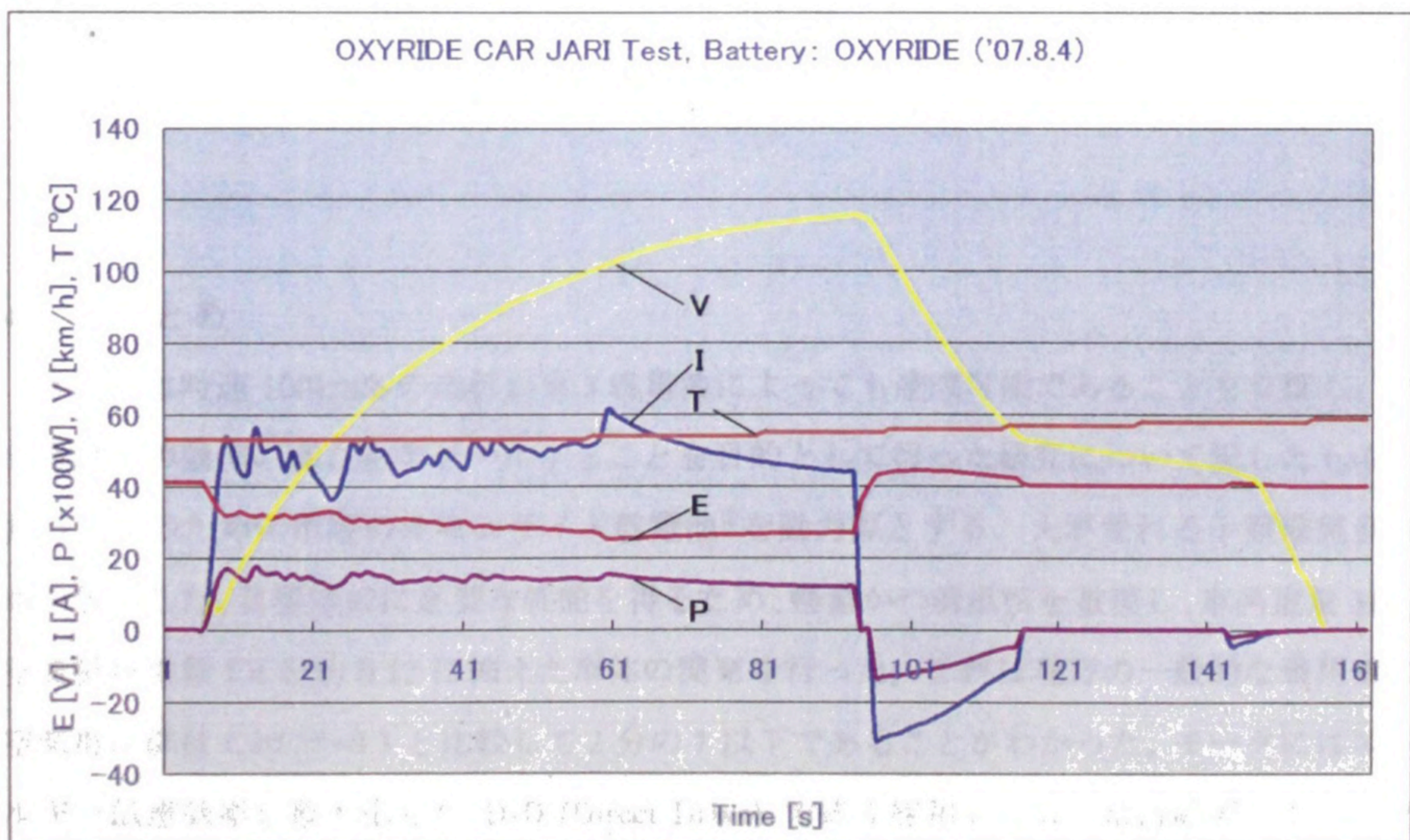


Fig.4-24 城里テストコース（茨城県水戸市）での走行テストデータ

Fig.4-24 に示す消費電力を元に走行時の抵抗を計算し、加速度を逐次求めることによって、予測される速度特性を求めた結果を Fig.4-25 に示す。実測された速度ときわめてよく一致していることがわかる。これらの走行データと数値計算結果により、計画した車両やその仕様、および動力系統の設計が正しかったことが確認できた。[芦田ほか(2007-e)]

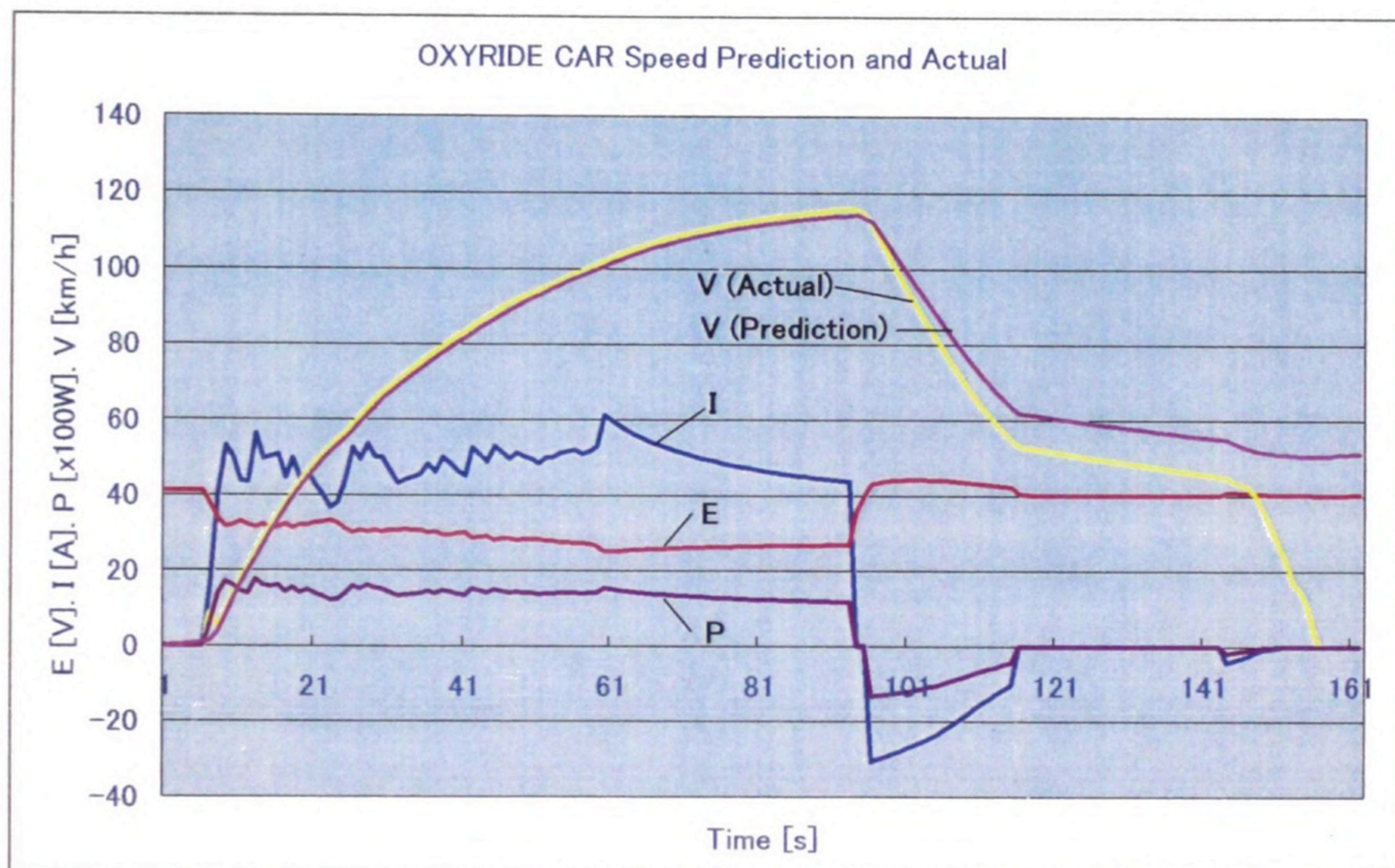


Fig.4-25 実際の使用電力を元に計算した速度の予測曲線と、実測曲線の関係を示す図

4-7 まとめ

本論文は時速 100km/h の走行が単 3 乾電池によっても達成可能であることを立証し、電気自動車の効率の高さをアピールすることを目的として行った研究について記したものである。そのために市販のオキシライド乾電池®を動力源とする、人が乗れる小型電気自動車を製作した。目標達成に必要な性能を得るため、軽量かつ低抵抗を重視し、車両重量 38kg、空気抵抗係数 C_d を約 0.12 に抑えた車体の開発を行った。これは現行の一般的な乗用車の空気抵抗係数 C_d 0.25~0.3 と比較して 2 分の 1 以下であることがわかった。モータにはエネルギー伝達効率を最大化した D-D (Direct Drive) 方式を採用し、広い電流範囲でモータ効率が 90%以上得られるモータを設計製作した結果、駆動力をロスなしで車輪に伝達するこ

どが可能となった。タイヤも転がり抵抗の少ない軽量なものを開発し、同サイズの自転車タイヤに比べ消費エネルギーが約半分のを完成させた。これらの効率化により、192本のオキシライド乾電池[®]を用いて100km/hを超える速度を維持して走行することができた。城里テストコースにおけるギネス・ワールド・レコーズ 世界記録認定委員立会の記録会では、規定された1kmの計測区間を平均時速105.95km/hで走り、この記録は【ギネスブック：2008年度版】へ掲載された。

ニッケル系一次電池（オキシライド乾電池®）を動力源とした 目標時速 100km の小型電気自動車用電源の最適化設計

1 はじめに

運輸関係において、電気自動車は、脱石油資源の最も有効な解決策である。電気自動車の実用化の鍵をにぎっているのは、その動力源である電池である。このような観点から電気自動車の有効性をアピールするため、単三乾電池[JIS C8500(2006)]でも時速 100km/h を達成できることを証明する実験に取り組んできた。本論文は、このプロジェクトで重要な項目となる電池系の最適化を行うために行った研究成果についてのべたものである。本研究では、電池として、従来のアルカリ乾電池に比べ、高出力、大容量の利点を持つ松下電池工業（株）が開発したオキシライド乾電池®を用いることにした。実験の結果、使用を予定している大電流放電領域において、60℃まで加温した場合に安全で最も効率が高いことが明らかになった。この結果に基づき、人間が乗って 100km/h を達成するため単三乾電池での最適なバッテリーシステムについて検討した結果についてのべた。

化石燃料の枯渇を防ぎ地球温暖化を抑制する方策として、燃料電池車やプラグインハイブリッド車を含む電気自動車が見直され、その開発が世界的に活発におこなわれている。しかしながら電気で走行する自動車の性能がまだまだガソリンで走る自動車に比べ劣っているためその普及に至っていない。電気自動車は優れた高効率モータ特性によって、本来ガソリン車をしのぐ性能を発揮できることは、電車が多くの面において蒸気や気動車より勝れていることが証明している。しかし電気自動車の普及がきわめて遅れているのは、搭載される電池システムに問題があるためである。本研究の目的は電気で走る自動車の効率がきわめて高いことをデモンストレーションすることである。その手段として乾電池でも人を乗せて高速度で走行可能なことを示す方法を考えた。

既にその手始めとして、2004 年に松下電池工業（株）製単 3 形オキシライド乾電池®2 本によって走る、Fig.5-1 に示す人が乗って動く小型電気自動車を開発した。また同じ 2004 年に、単 3 形オキシライド乾電池®2 本で走る、Fig.5-2 に示す子供用電動カートを開発した。更に同 2004 年に、単 3 形オキシライド乾電池®8 本によって走る、Fig.5-3 に示す小型電動バイクを開発した。それを更に前進させ、単 3 乾電池で人が乗って時速 100km/h を超える自動車を製作するプロジェクトを推進し、その実現に向けた研究を始おこなった。本

ではそのうち、この目標達成のための電源システムの最適化についての研究結果について述べる。

本プロジェクトの目的である電気自動車の有効性を広く周知するため、ギネスブックにすることを目標にした。出力性能の限られた乾電池を利用した小型電気自動車の開発に、高効率・低抵抗の電源系と電池出力の最適化が不可欠である。

乾電池を用いて人の乗れる自動車に使うためには、本来の使用環境とは著しく異なる条件下での特性を知ることが第一に必要とされる。そこで、本研究では、まず、オキシライド乾電池[®]の高出力特性とその温度依存性を実験により取得する。既に第4章【ニッケル系一次電池（オキシライド乾電池[®]）を動力源とした目標時速 100km の小型電気自動車の動力設計】[Ashida.T. ほか(2007-a)]「4-2」の「1.2.3.4.」項で述べた小型電気自動車で時速 100km/h の目標を達成するために重要なことのうち、「1.2.3.」項は第4章で述べている。本章では「4.」項の『乾電池の種類選択と搭載本数および使用温度の最適化』についてのみ述べる。

Fig.5-4 は第4章で示した本プロジェクト用に開発・製作した小型電気自動車であり、本論文では、この車両の為に用いる電池システムを開発した結果を述べる。



Fig.5-1 単3形オキシライド乾電池[®]2本で走る小型電気自動車（2004年）



Fig.5-2 単3乾電池2本で走る子供用電動カート（2004年）



Fig.5-3 単3乾電池8本で走る小型電動バイク(2004年)

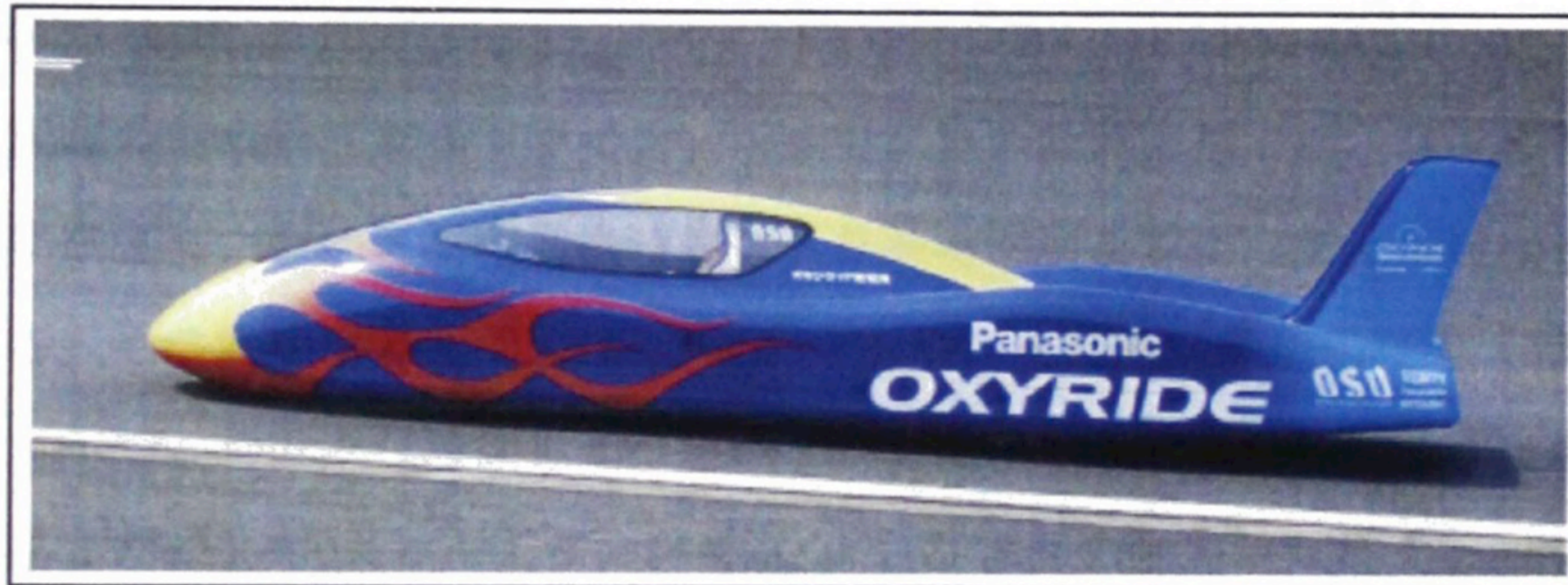


Fig.5-4 本論文で述べる電池システムを搭載するため

※本プロジェクト用に開発・製作した小型電気自動車 [Ashida.T. ほか(2007-a)]

5-2 オキシライド乾電池®の目標性能

松下電池工業(株)が製造したオキシライド乾電池®がエネルギー密度の観点で最も適していると考え、主としてこの電池を用いてのプロジェクトの実現性を検討した。

5-2-1 オキシライド乾電池®搭載本数の最適化

動力源となるオキシライド乾電池®の数を最小限にすることは、重量増加を防ぐだけでなく、なるべく低エネルギー走行の可能性を探るといふ、本来の技術的研究目標からも重要である。まずオキシライド乾電池®の公表された性能を基本に、我々の目標である極端な条件における、オキシライド乾電池®の持つ特性を見極める必要がある。オキシライド乾電池®の性能を有効に引き出し、小型電気自動車の高速走行を実現させるためには、電池エネルギー放出の最適条件を探るとともに、目標達成に必要な電力量を把握し、その電

力量を効率良くまかなうための電池の使用本数の最適化を図ることが重要である。また、走行の高負荷によって過熱しオキシライド乾電池[®]が危険な状態に至らないための条件を検討することも重要である。

使用する乾電池は、松下電池工業（株）製単3形オキシライド乾電池[®]として検討する。まず、本プロジェクトの目標達成に設計した、Fig.5-4 に示す車両の仕様に基づき、高速走行時に必要な電力を検討する。次に、その電力を最小限のオキシライド乾電池[®]本数でまかなえるよう、オキシライド乾電池[®]の持つ高出力性能を最適化することをおこなう。

5-2-2 必要な電力量

「GUINNESS WORLD RECORDS」が示す「RECORD BREAKER'S PACK」の「一般規則」および速度記録のための「ガイドライン」の速度記録の計測方法では、1kmの計測区間を1時間以内に往復し、計測区間の通過時間により平均速度を算出して記録速度と認定すると定めている。そのため本研究では加速時間（60秒）＋計測区間通過時間（36秒）＋減速時間（24秒）で、合計走行時間を120秒間と想定したとき、本プロジェクトの動力系設計に関する第4章の表 Table 4-4 より、必要電力は60秒間の加速時は最大2000W、加速終了後100km/hの速度維持のため約60秒間1000Wの電力が必要であることがわかる。

オキシライド乾電池[®]の性能を十分に生かすために、乾電池の性能評価を行なう。まずメーカーから公表されている性能公称値をもとに、電池の必要本数を概算する。Fig.5-5 に示すメーカーによるオキシライド乾電池[®]定電力連続放電時の温度特性の情報[松下電器(参照 2007-5)]によると、出力電力一定の条件では高温になるほど出力持続時間が伸びることが分かる。また一定出力可能時間に対し、電池温度が高温になるほど大きな電力が出力できることがわかる。Fig.5-6 に示すメーカーによるオキシライド乾電池[®]の定電流放電時の、標準放電特性の情報[松下電器産業(参照 2007-5)]と合わせ、走行に必要な電池の使用本数を予測する。Fig.5-5 のグラフでは、走行を予定する120秒の短い時間は表されていないため、単調減少のグラフから20℃の120秒時の値を予測すると、20℃の条件下ではオキシライド乾電池[®]1本の一定な電力は2500mW以上と予測できる。このことから120秒後において出力1000Wを確保するには、オキシライド乾電池[®]の使用本数が概算で400本必要であることがわかる。

Fig.5-6

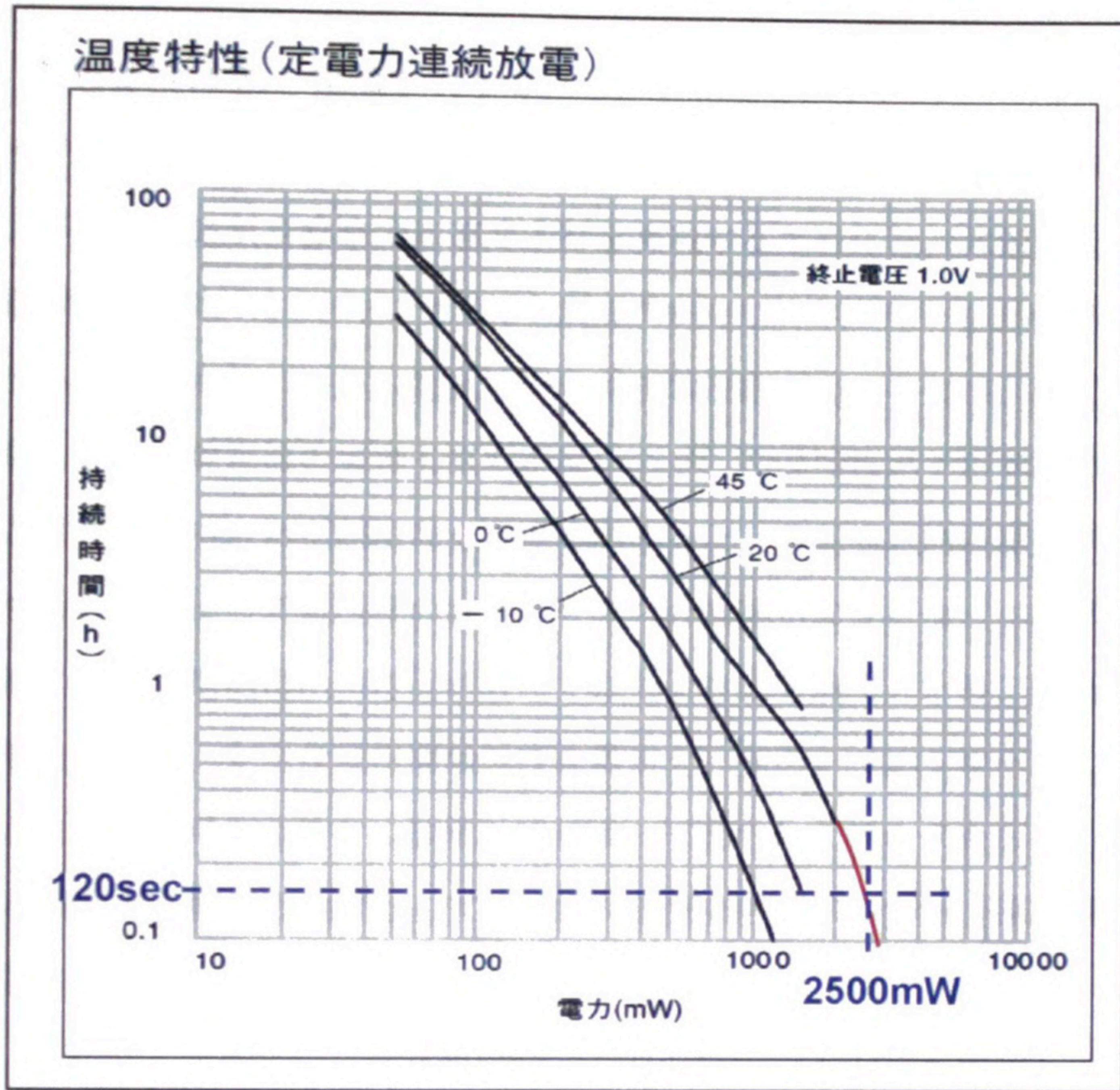


Fig.5-5 オキシライド乾電池®定電力連続放電時の温度特性 [松下電器(参照 2007-5)]による

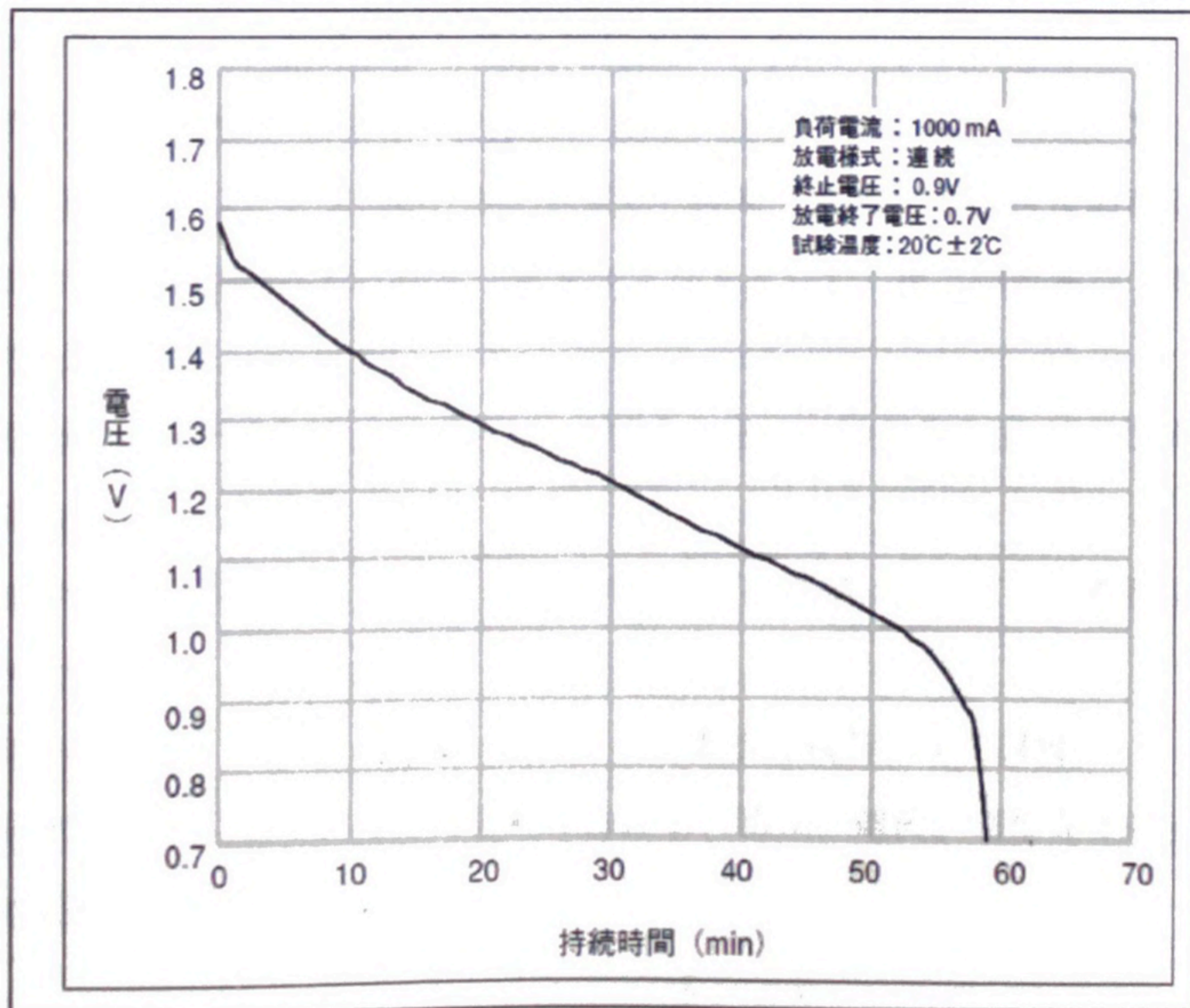


Fig.5-6 オキシライド乾電池®定電流放電時の標準放電特性 [松下電器(参照 2007-5)]による

5-2-3 電池特性確認と電源システム

オキシライド乾電池[®]の性能は通常の使用条件では公表されているが、本プロジェクトのように人が乗った電気自動車で高速度走行を実現するためには、大電流放電という条件下での性能評価を行ない、オキシライド乾電池[®]の持つエネルギーを短時間に引き出す方法を確立する必要がある。一方、電池に限らず化学反応を伴うものは、温度が高い方が一般的に反応も速い。乾電池の場合も温度が高い方が、内部抵抗が下がり電力が取り出しやすくなると考えられる。ただ制限なく温度を高めると、乾電池の内部圧力が上昇し、安全弁が作動することによって電解液の液漏れやガスの噴出が起きるなど、非常事態に繋がる可能性が高い。また電池は出力電流が大きくなると自己発熱するため、高出力時における発熱の状態を確かめ、安全な使用開始温度を設定し、発熱をコントロールすることが重要である。さまざまな環境条件での放電試験によって得られたデータをもとに、本プロジェクト用の小型電気自動車用電源として、次節で最終的なオキシライド乾電池[®]の搭載本数を決定する。

5-3 実験

5-3-1 オキシライド乾電池[®]放電特性確認の手順

オキシライド乾電池[®]の特性データ取得のために、次の順に実験を行った。

- ①未使用のオキシライド乾電池[®]を小型電気自動車で使用する場合における、モータを含むシステム制御の容易さから、基本ユニットとして、単三型乾電池 24 本直列で使用すると決める
- ②特性取得に使用するオキシライド乾電池[®]を、予め試験温度に設定した保温庫内で 12 時間保温
- ③24 本直列状態で加温前・加温後・放電試験後の各段階において、総電圧と内部抵抗の変化を測定
- ④24V 印加時 5A になるよう設定したスライド抵抗を負荷として接続
- ⑤走行時間に相当する 120 秒間の放電における、電圧、電流、温度変化特性をデータロガーに記録

Table 5-1 はオキシライド乾電池[®]放電試験に使用した測定機器類である。

Table 5-1 放電試験 使用機器一覧

名 称	メーカー	型式・仕様
Battery tester	日置電機	バッテリーハイテスタ 3554
Circuit tester	三和電気計器	デジタルマルチメータ CD731
データロガー	EAGLE TREE SYSTEMS	E-Logger MPR-02
Load resistance	DTO	11Ω 200W

前項の手順で、電池温度の異なる条件下での、オキシライド乾電池[®]24本直列ユニットによる放電試験を実施した (Fig.5-7)。放電電流はほぼ 5A 一定で行った。室温 25℃における場合 (Fig.5-8, Table 5-2) に比べ 60℃で保温した電池ユニットの場合 (Fig.5-9, Table5-3) 127%以上の出力が得られた。図中バッテリーの電圧を E、電流を I、消費電力を P、温度を T とした。また 70℃まで加温した場合 (Fig.5-10, Table 5-4)、室温 25℃における場合に比べ 147%以上の出力が得られた。これらの結果から、放電開始時の電池温度が高いほど、高出力であることが予測通り実証された。また、Fig.5-10 に示す 70℃の実験において、放電中に 80℃を超えた 1本の電池では、乾電池内部の圧力上昇による安全弁が動作し電解液の漏れることが確認された。その電池が原因となり電池ユニット全体の内部抵抗の上昇も見られた。このことから、電池ユニットの安全基準として 80℃以下での運用を決定した。

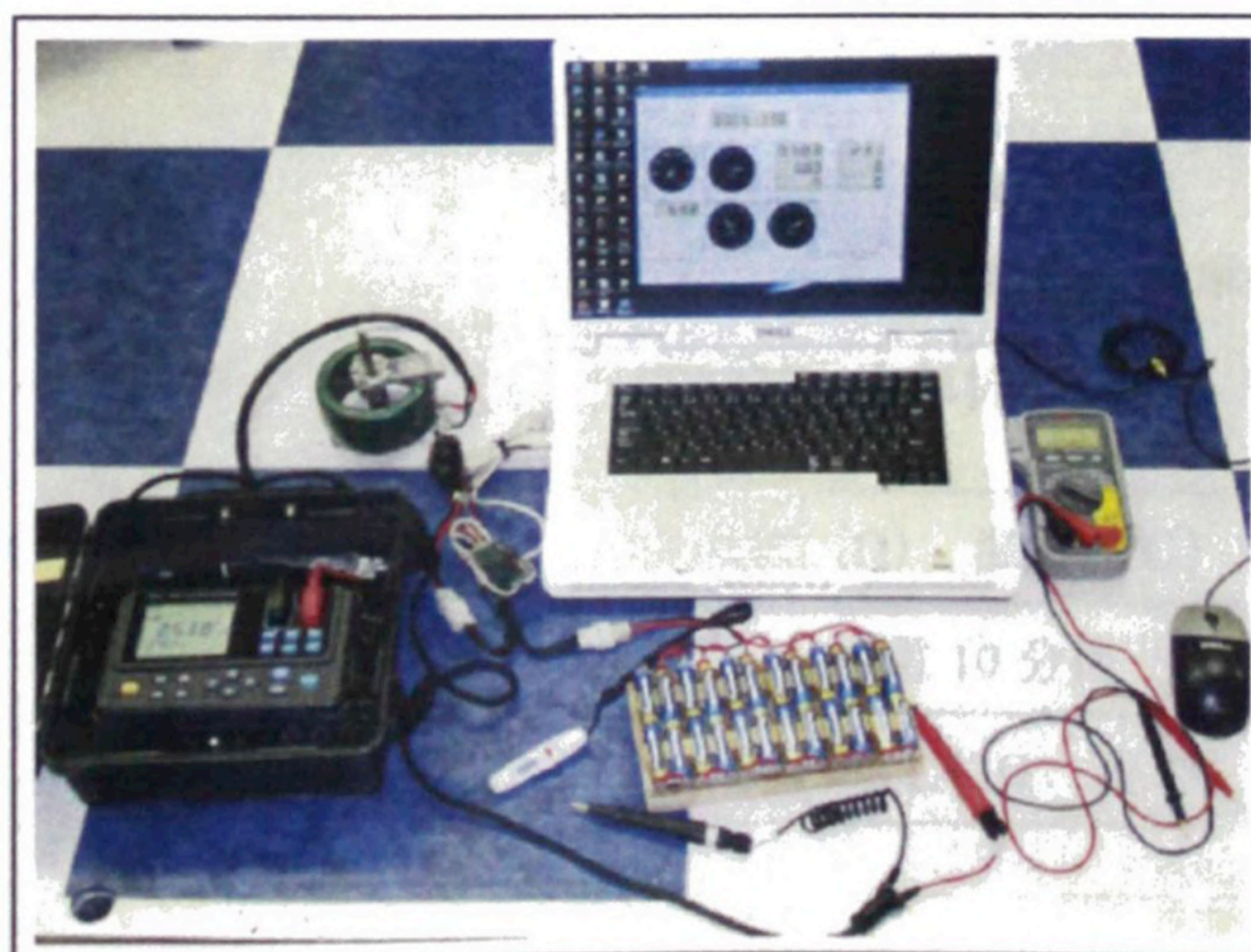


Fig.5-7 放電試験の様子

※写真中央下側にあるのが電池ユニット

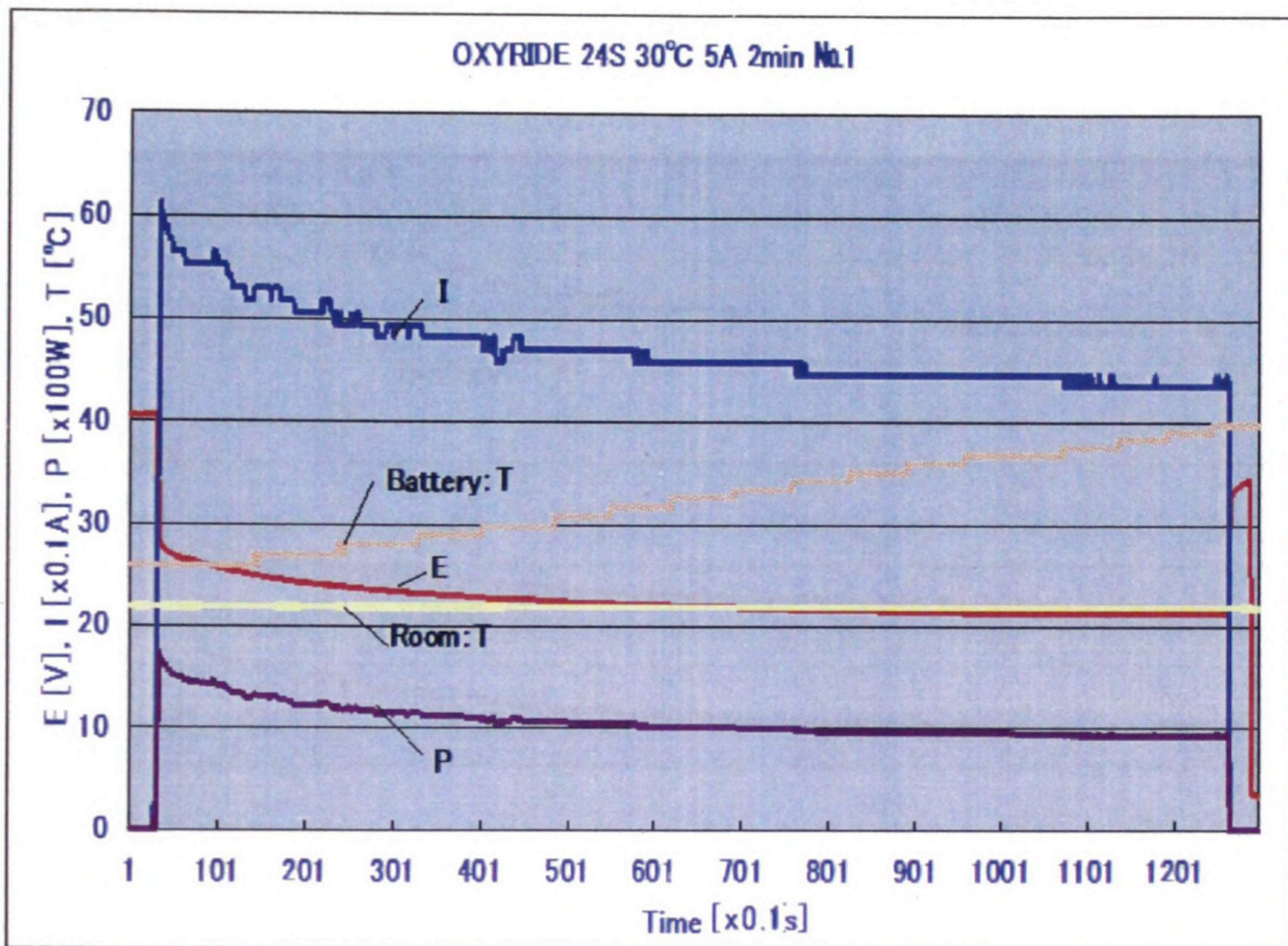


Fig.5-8 オキシライド乾電池[®] 24 本直列 26°C 12 時間保温 室温で 2 分間放電試験
 ※放電開始時出力 173W 電池温度 25.9°C、120 秒間放電終了時出力 93W 電池温度 39.8°C

Table 5-2 は Fig.5-8 の実験におけるオキシライド乾電池[®] 24 本直列の
 放電試験前後の負荷開放での電圧・内部抵抗・温度

24 本直列 電圧 (V)			内部抵抗 (Ω)		温度 (°C)
放電前			放電 10 分後		
41.3V	2.241Ω	25.9°C	39.0V	1.43Ω	39.8°C

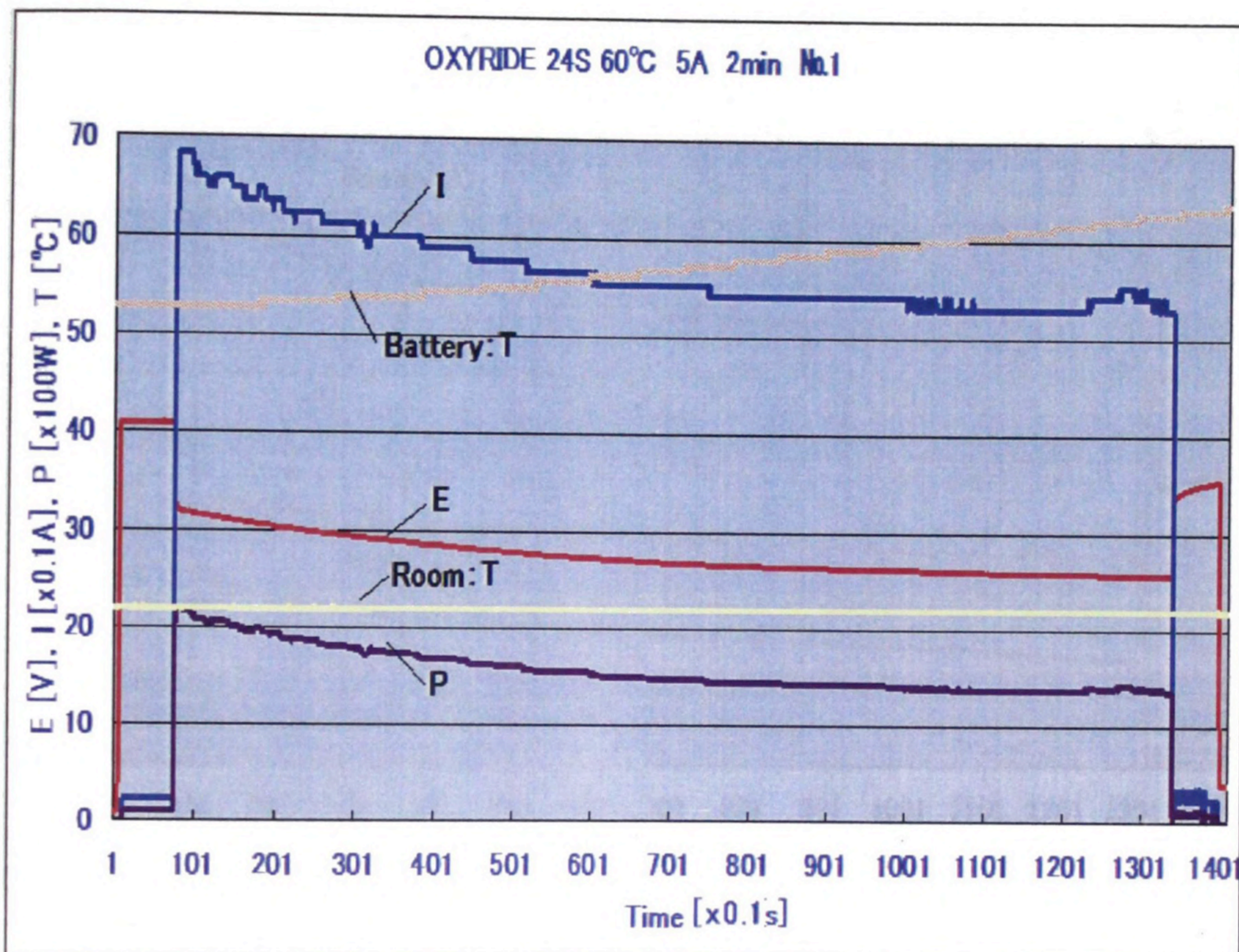


Fig.5-9 オキシライド乾電池[®] 24本直列 60°C12時間保温 室温で2分間放電試験
 ※放電開始時出力 219W 電池温度 52.8°C、120秒間放電終了時出力 139W 電池温度 62.7°C

Table 5-3 は Fig.5-9 の実験におけるオキシライド乾電池[®] 24本直列
 加温前・加温後・放電後の負荷開放での電圧・内部抵抗・温度の変化

24本直列			電圧 (V)			内部抵抗 (Ω)			温度 (°C)		
加温前			加温後・放電前			放電後					
41.3V	2.280Ω	28°C	41.27V	1.695Ω	52.8°C	39.67V	0.923Ω	63.2°C			

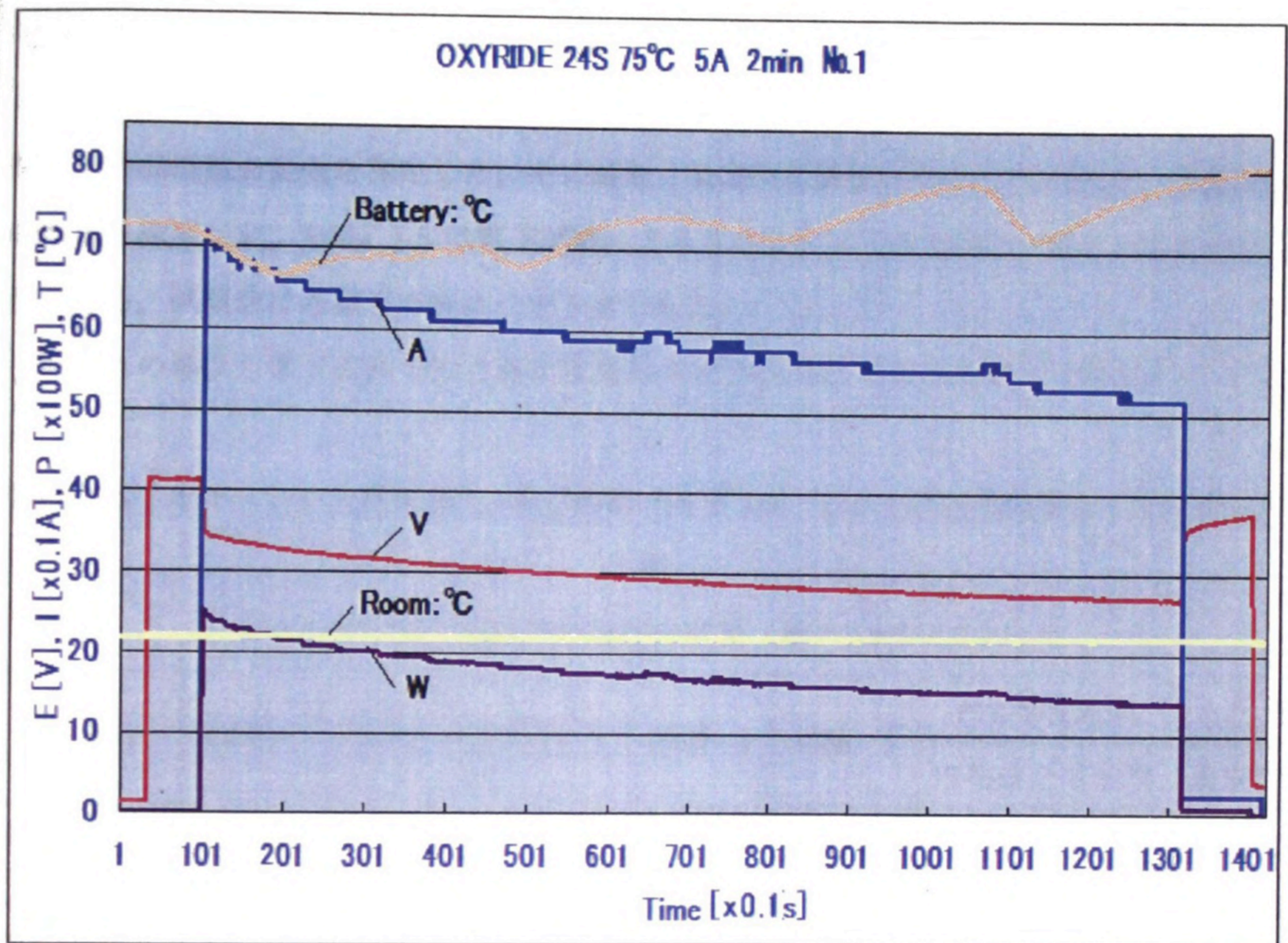


Fig.5-10 オキシライド乾電池®24本直列 60°C12時間保温後
 48V 0.5A 1.5時間充電で70°Cまで加温 室温で2分間放電試験
 ※放電開始時出力 254W 電池温度 71.2°C、120秒間放電終了時出力 140W 78.6°C

Table 5-4 は Fig.5-10 の実験におけるオキシライド乾電池® 24本直列
 加温前・充電後・放電後の負荷開放での電圧・内部抵抗・温度の変化

24本直列			電圧 (V)	内部抵抗 (Ω)	温度 (°C)
加温前			加温・充電後・放電前		放電後
41.46V	2.440Ω	28°C	41.58V	0.752Ω	69.7°C
			40.52V	1.02Ω	86.6°C

2 衝撃試験

小型電気自動車の電源に使用するためには、オキシライド乾電池[®]の衝撃による性能変化の確認も重要である。その確認のため落下による衝撃を加え、電池性能の変化を調べた。コンクリート床面に対し、オキシライド乾電池[®]の向きを決め、1mの高さから落下させて電圧と内部抵抗の変化を測定した。その結果、乾電池に衝撃が加わった場合の、内部抵抗の増加を確認した。Table 5-5 は落下試験によるオキシライド乾電池[®]の電圧・内部抵抗変化である。試験数は各落下方向につき5本である。

いずれの場合も落下前後で出力電圧は変化せず、10%以下の内部抵抗の増加があった。

Table 5-5 オキシライド乾電池[®] 落下衝撃（高さ1m）による内部抵抗変化・変化率の平均

※この時の落下衝撃度は測定の結果、最大1000Gであった

落下方向	試験：1	試験：2	試験：3	試験：4	試験：5	内部抵抗変化		外観
						平均値	変化率	変形の程度
(+) 極を下側	+9.6mΩ	+8.1mΩ	+4.0mΩ	+2.6mΩ	+11.7mΩ	+7.2mΩ	+7.6%	.3mm程陥没
(-) 極を下側	+7.7mΩ	+2.7mΩ	+11.8mΩ	+7.6mΩ	+5.7mΩ	+7.1mΩ	+7.1%	小傷
側面	+4.7mΩ	+7.9mΩ	+2.7mΩ	+6.3mΩ	+7.3mΩ	+5.9mΩ	+6.0%	異常なし

5-3-3 電源ユニットの設計

放電試験の結果から、電池温度を高く保った方が、短時間放電では加温しない場合より明らかに大きな出力が得られることが確認された。60℃保温の場合、24本直列で120秒後139Wを出力した。したがって、衝撃による内部抵抗変化が生じていない乾電池を使用する場合、加速終了後、計測終了地点まで120km/hで巡航すると仮定した場合の必要電力は、第4章のFig.4-3のデータから1105Wであることがわかり、24本直列の基本電源ユニットが8並列で足りることが分かる。これにより小型電気自動車に搭載する電源ユニットのオキシライド乾電池[®]本数を、24直列×8並列、総本数192本に決定した。また電源ユニットを60℃に加温して使用することも併せて決定した。これにより、当初想定した搭載本数400本を半数以下に抑えることができた。車体の搭載スペースの関係から一つの電源ユニットを、24直列4並列96本に纏め、それを2段に重ねて搭載することにした (Fig.5-11, Fig

)。

電池の接続にあたっては、走行中いずれかの電池に異常が発生したり、接触不良などが生じたりした場合に、直列配線の一系統全ての電池が無効になるのを防ぐため、本組の電源ユニットは24直列4並列でなく、2直列4並列12直列とするバックアップを施した。Fig.5-13は4直列4並列のバックアップ配線の例である。これにより搭載電池の一部に不具合が生じてても、並列に繋いだ他の電池が負担を分け合い、著しい電力不足とならない方法をとった。なお電池の並列接続は、並列にした個々の内部起電力の違いによる自己放電を生じるため、そのまま長期保存しないのは言うまでもない事である。

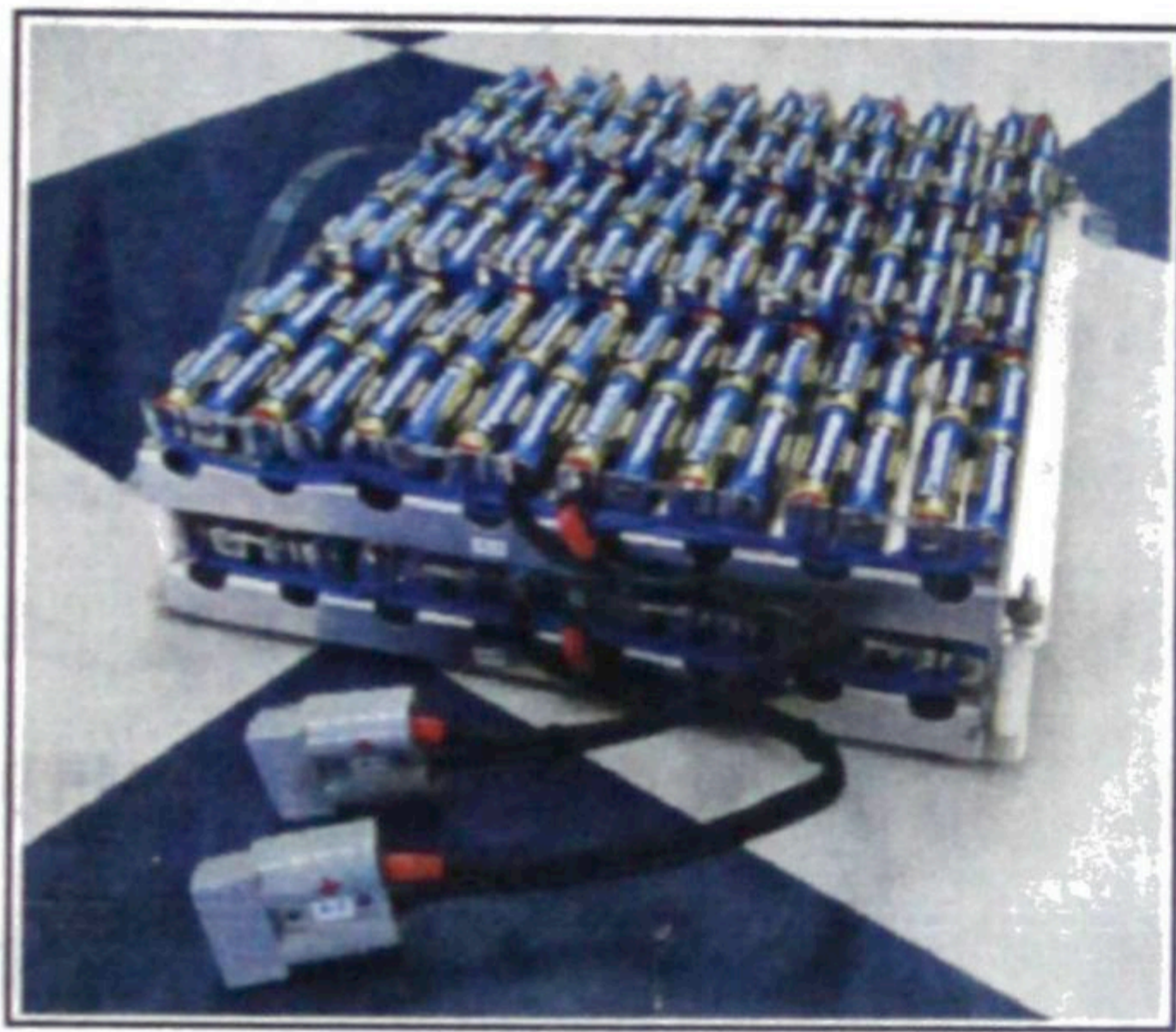


Fig.5-11 電池ホルダー

※24直列4並列96本 2段重ね

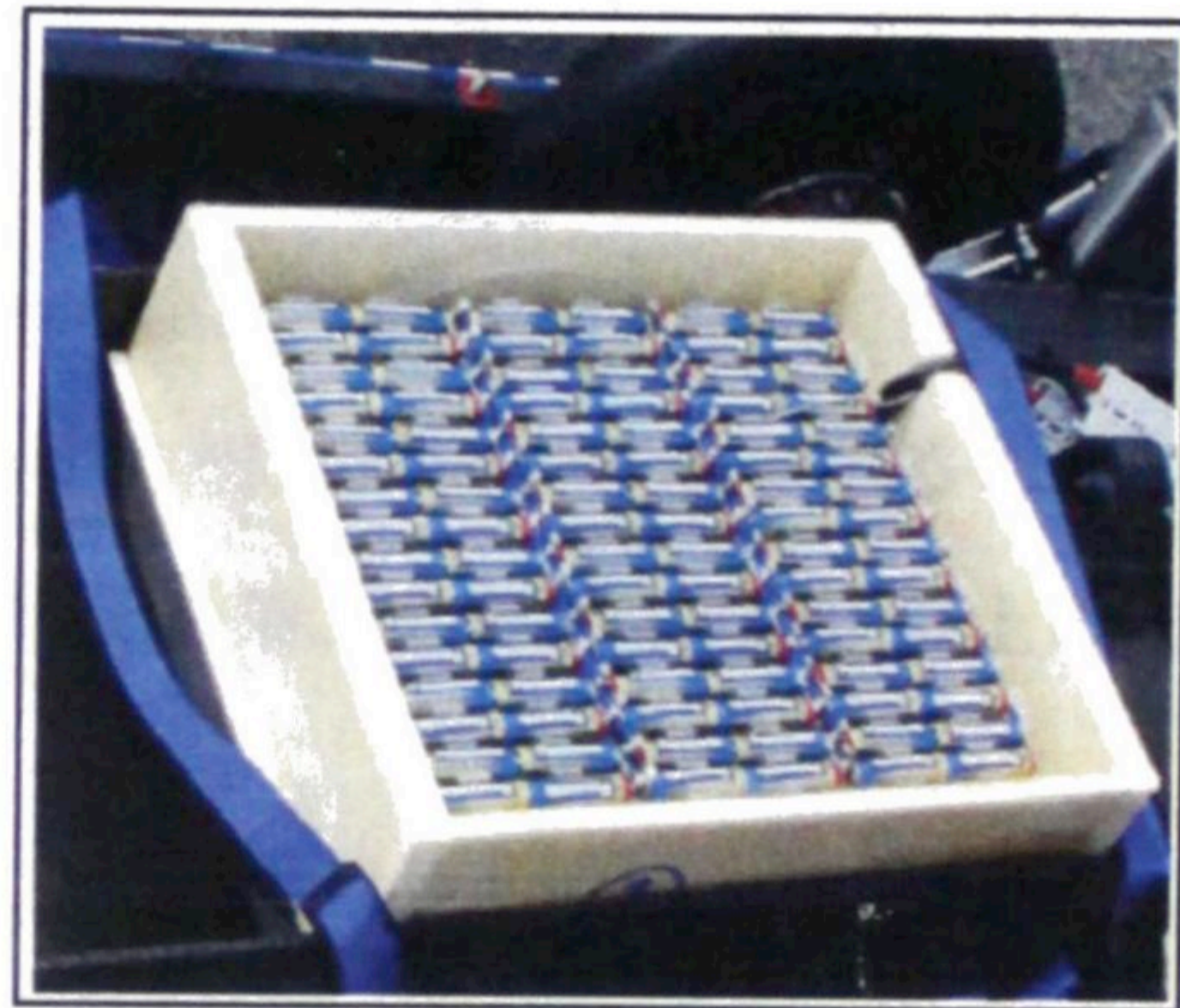


Fig.5-12 オキシライド乾電池®保温箱

※住宅用保温断熱材を使用

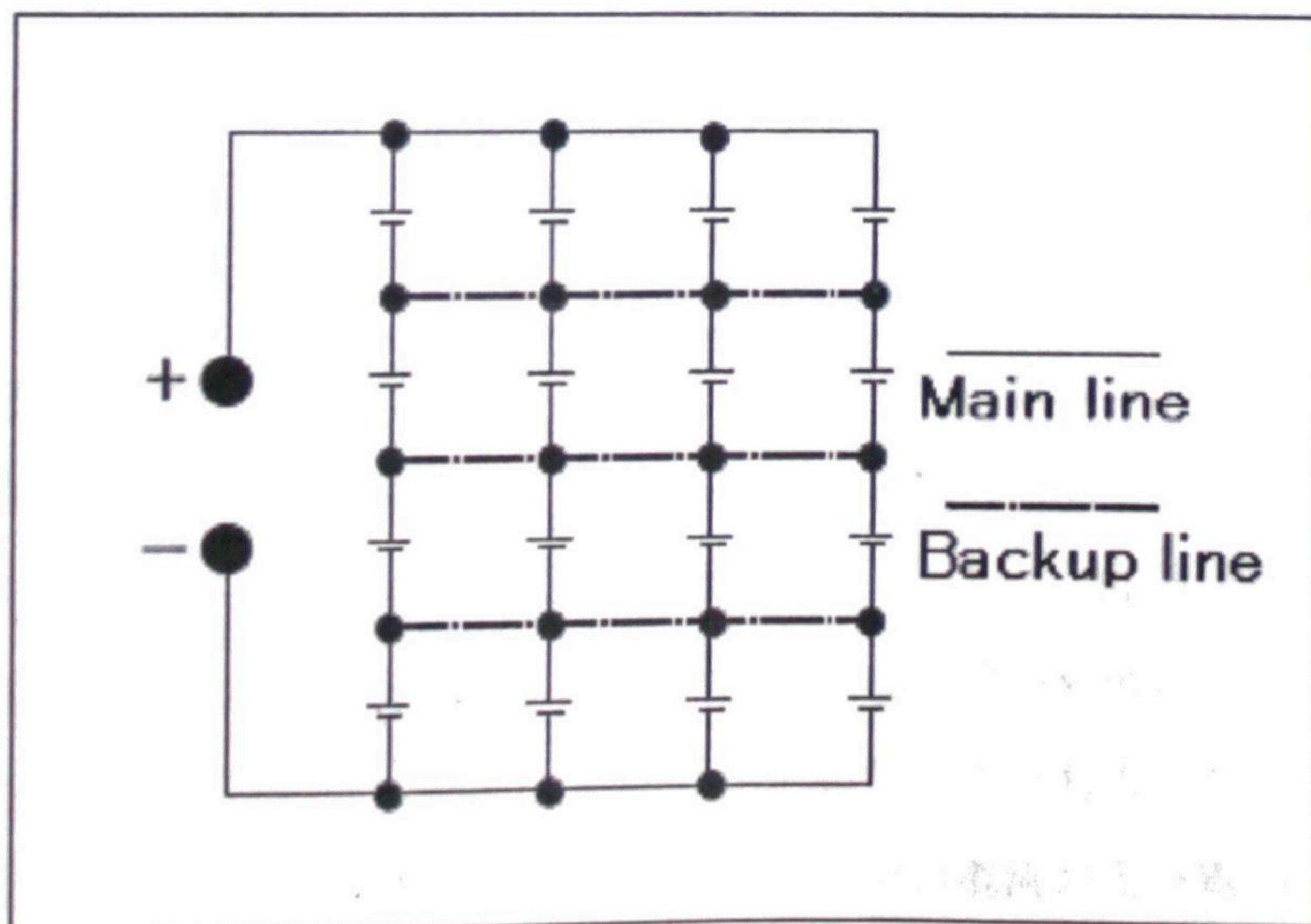


Fig.5-13 4直列4並列時のバックアップ配線方法

5-4 走行試験

5-4-1 走行テスト

完成した電源ユニットの能力や安全性を含む信頼性を確かめるとともに、目標とする速度記録達成のための基礎データを得るため、旧白浜空港の滑走路を使って走行試験を実施した。車体および動作系は、第4章で述べたものを使用した。第4章[Ashida.T., ほか(2007-a)]のFig.4-20(Fig.5-14)に示したとおり、実際に100km/hを越えている時間は5秒間であり、また最大瞬間出力は2374Wであった。1300W以上の出力を45秒間維持した後の出力電力が1500Wを超えていることがわかり、距離さえあれば1kmの計測区間で平均時速100km/hを維持できることが確かめられた。

第4章のFig.4-22 (Fig.5-15)に示したとおり、ギネス記録走行会の会場である、財団法人 日本自動車研究所 城里テストコースにおいても記録走行会当日の早朝、走行テストを行なった。その結果、走行テストにおいて100km/h以上の速度を41秒間持続した後に、このオキシライド乾電池[®]は更に1100W以上の出力が維持可能であることが確認できた。この走行テストでの最大瞬間出力は1770Wを記録、その後1200W以上の出力を80秒間維持、最高速度115.9km/hに達した。

Fig.5-16は比較のため同条件で実施したアルカリ乾電池による走行テストデータである。アルカリ乾電池は最大出力1276Wを記録、その後800W以上の出力を93秒持続し、最高速度は102km/hであった。オキシライド乾電池[®]がアルカリ乾電池に比べ139%ほど最高出力が高く出たことがわかる。但しアルカリ乾電池の最高温度は15℃ほど低かったことが分かる。

Fig.5-14・Fig.5-15・Fig.5-16・Fig.5-19の各データにおいて縦軸中、E[V]は電力源となる単3乾電池24直列・4並列・2並列、合計192本の組電池状態での電源ユニットの出力電圧を示す。I[A]は同電源ユニットの出力電流を示す。P[W]は電源ユニットの出力で電力で電圧・電流の積で示す。V[km/h]は走行速度を示す。T[℃]は電池ユニットの保温箱内部温度を示す。横軸Time[s]は経過時間を示す。Fig.5-14・Fig.5-15・Fig.5-16・Fig.5-19のどのデータにおいても、速度が最高点に達したあと電流および電力の値がゼロになっているのは、アクセルとなるボリュームを閉じ出力をゼロとしたためである。なおその時、回生による制動をおこなった場合、回生の出力によりグラフ中の電流および電力は負の値となり電圧は上昇している。またFig.5-19のデータ中央部で電流と電力の値がゼロを示し、電圧が上昇しているのは記録走行の方法に従い、往路から復路へ車両の向きを変える間である。

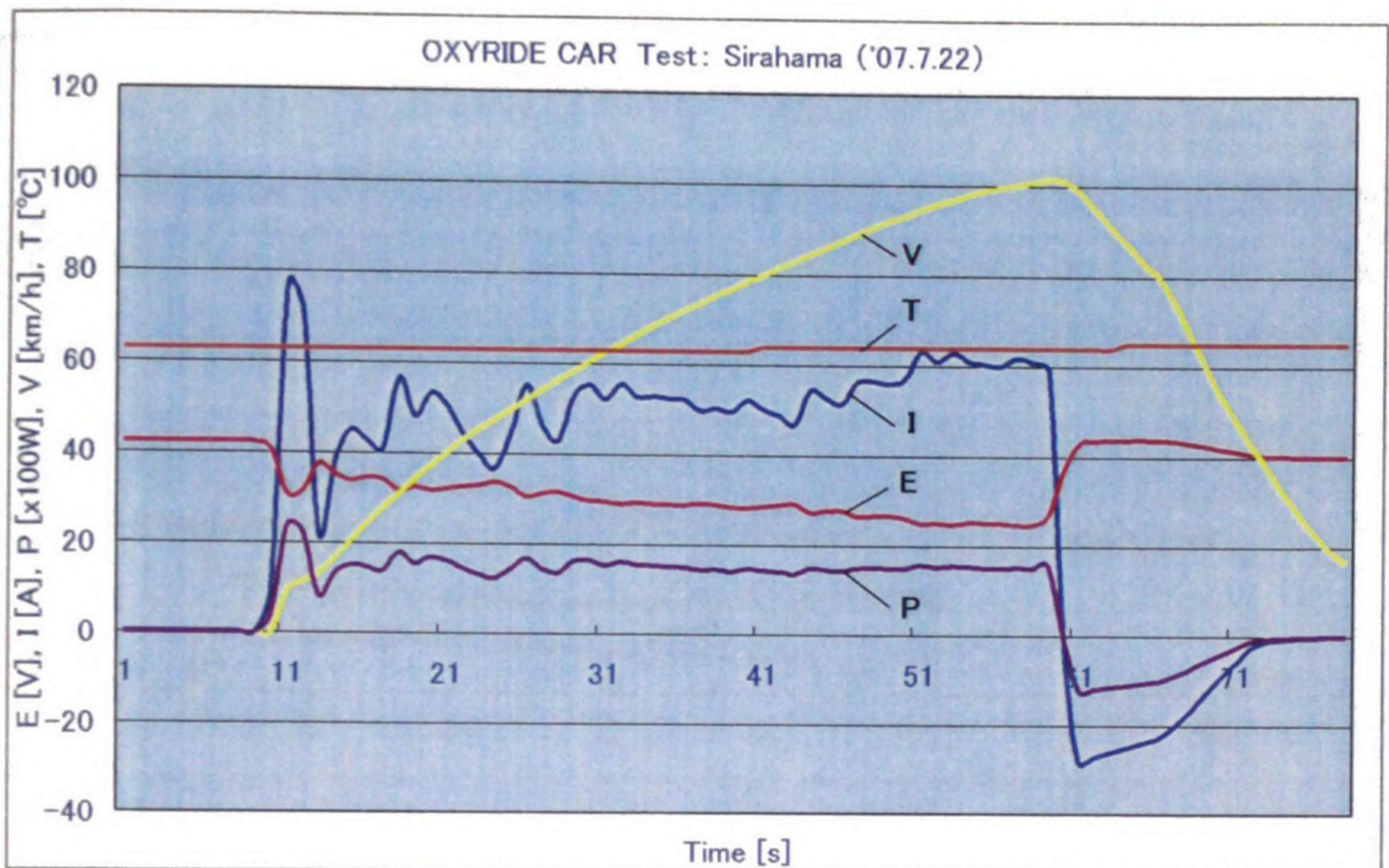


Fig.5-14 旧白浜空港での走行テストデータ [Ashida.T. ほか(2007-a)] (Fig.4-20) による

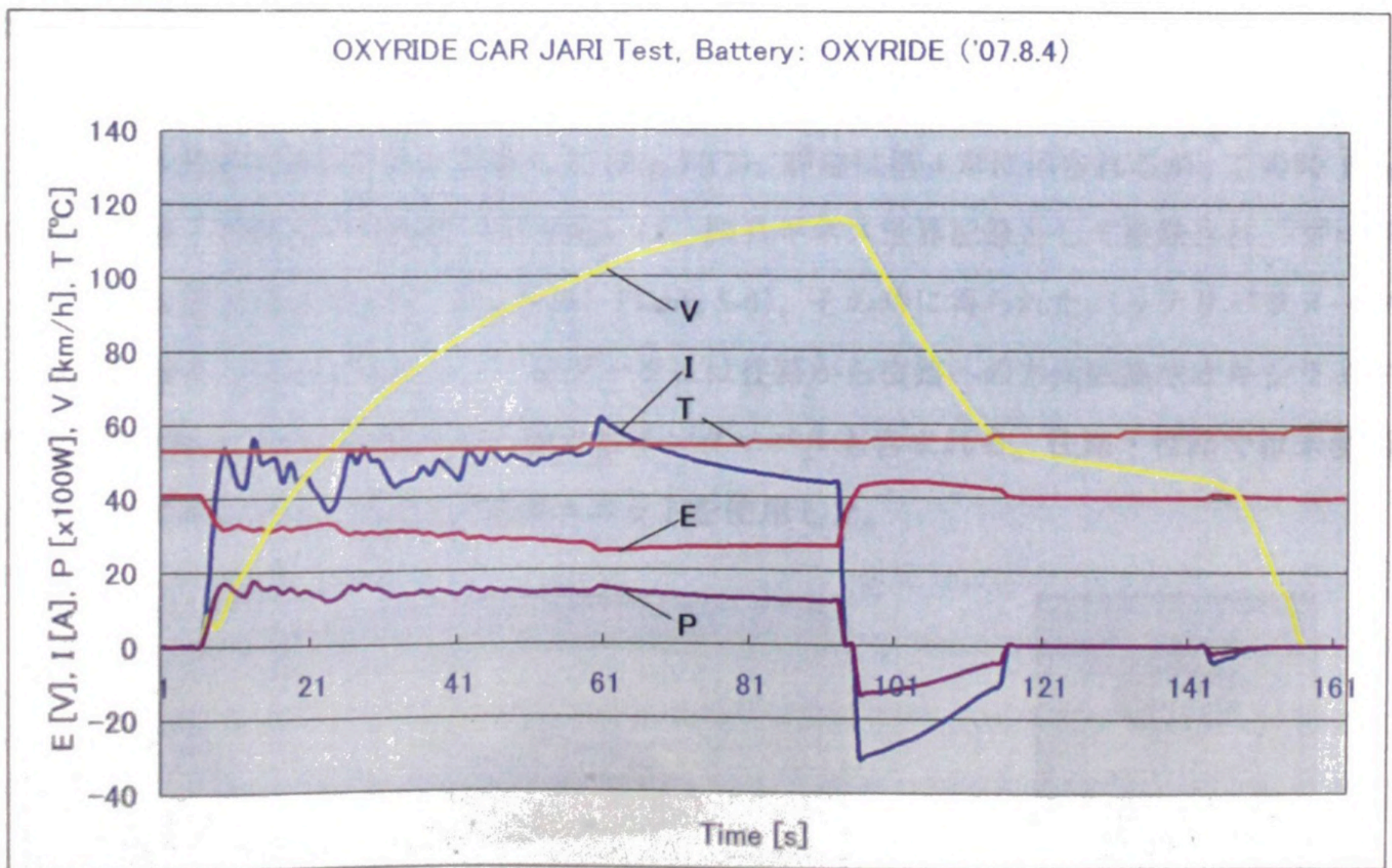


Fig.5-15 オキシライド® (192本) 走行テスト 城里テストコース 07-8-4

...会における復讐老[Ashida.T. ほか(2007-a)] (Fig.4-22) による

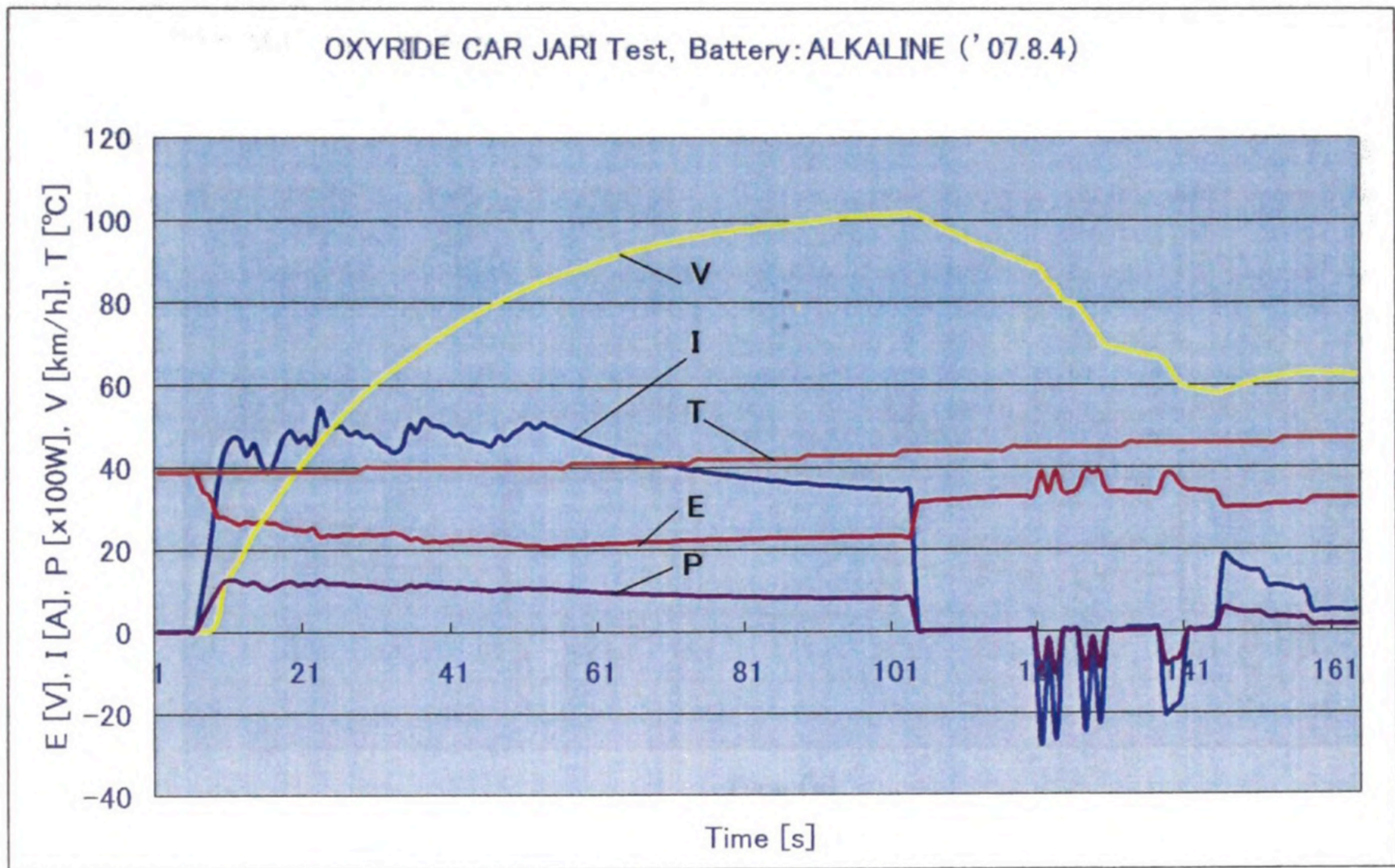


Fig.5-16 アルカリ乾電池（192本）走行比較テスト 城里テストコース 07-8-4

5-4-2 速度記録

2007年8月4日、茨城県にある、財団法人 日本自動車研究所 城里テストコースにおいて、ギネス世界記録走行会を実施した (Fig.5-17)。詳細は第4章に示されるが、この時1km区間の往路・復路の平均速度 105.95km は、同日ギネス世界記録として登録され、プロジェクトの目標が達成できた (Fig.5-18) (Table 5-6)。その時に得られたバッテリーパラメータと速度記録を Fig.5-19 に示す。このデータには往路から復路への方向転換やオキシライド乾電池®電源ユニット取替え等に要するインターバルも含まれる。往路・復路では未使用の2組のオキシライド乾電池®電源ユニットを使用した。

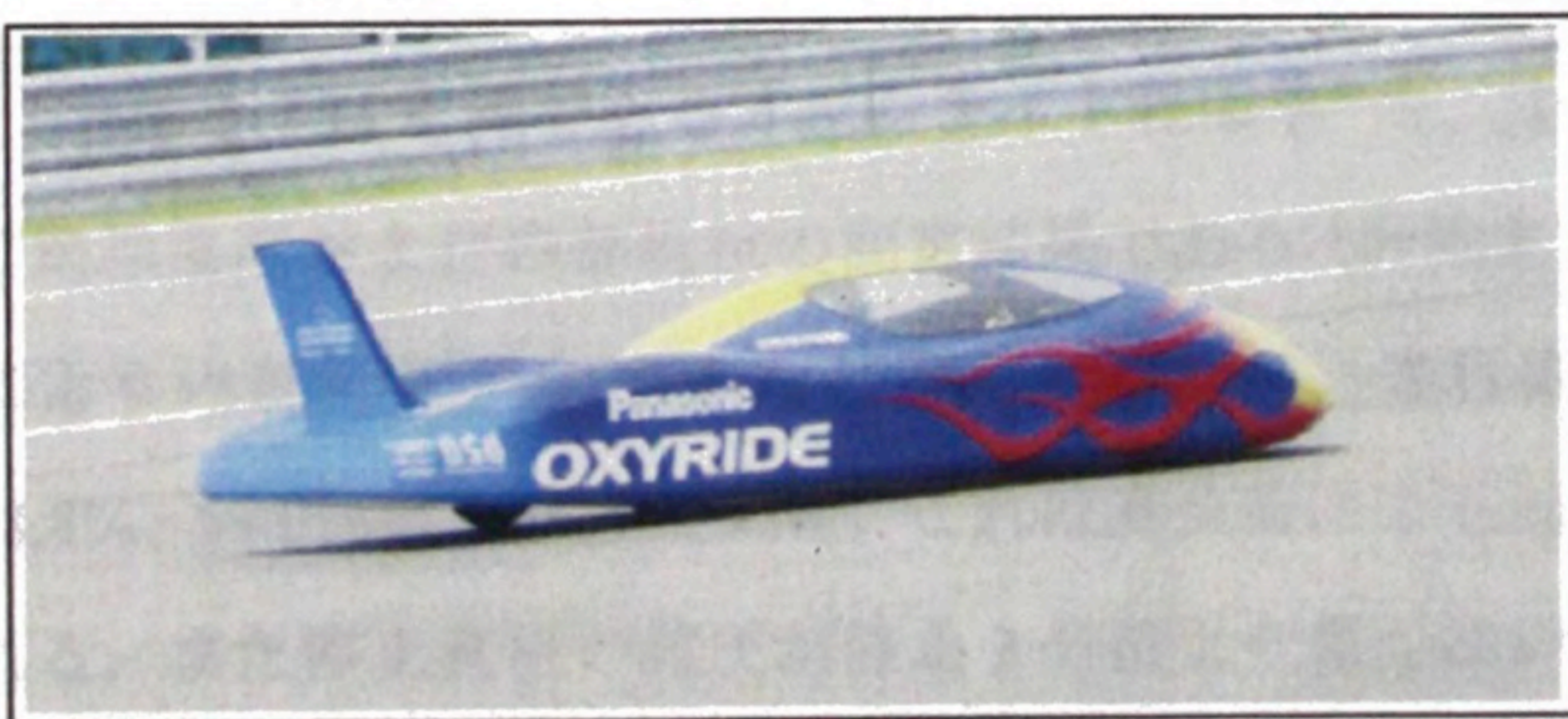


Fig.5-17 ギネス世界記録走行会における復路走行の写真



Fig.5-18 ギネス記録認定書

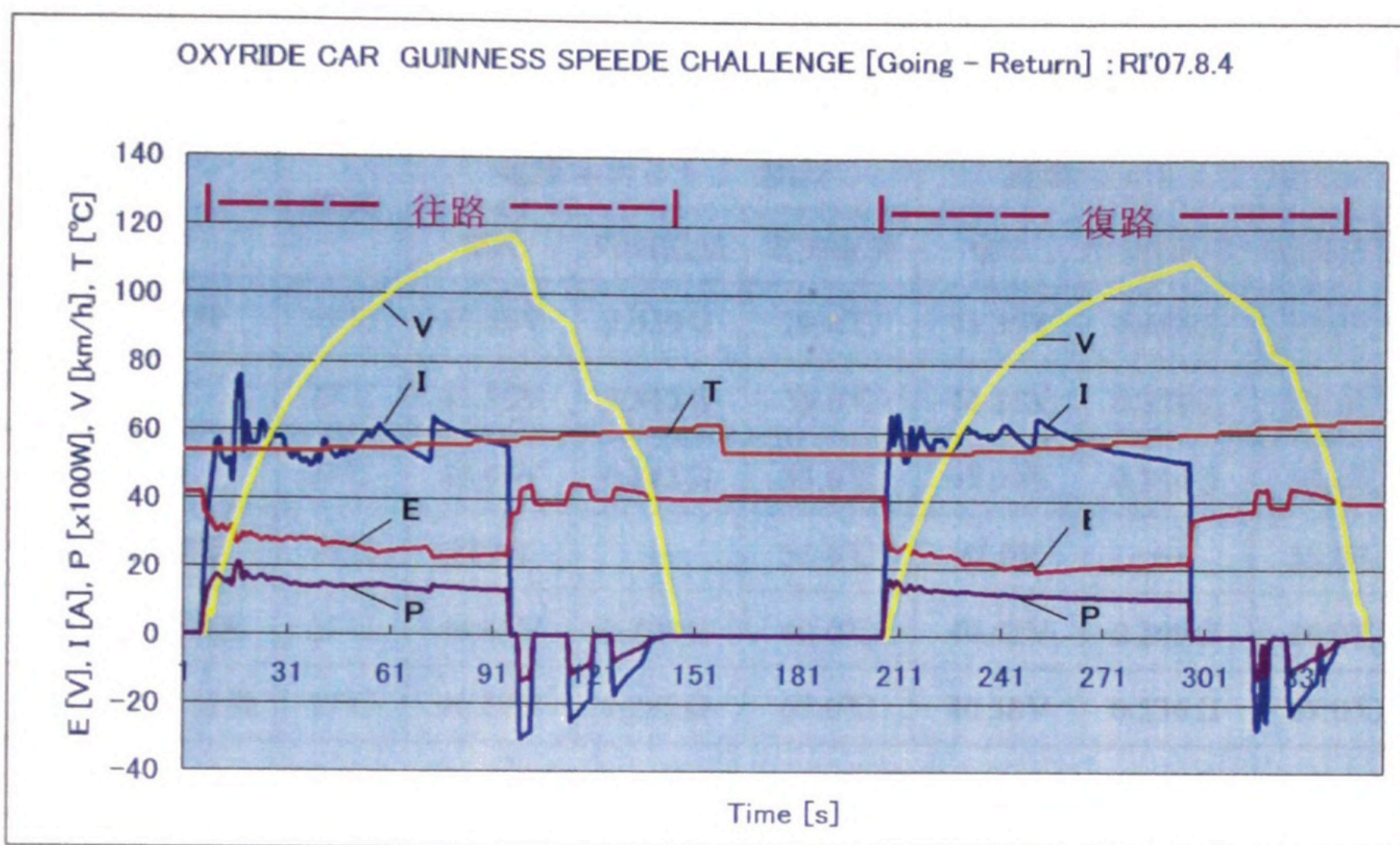


Fig.5-19 ギネス世界記録走行会 走行記録 城里テストコース 07-8-4

Table5- 6 往路・復路計測結果

項	進路： 方向	1km 通過時間	1km 計測区間平均速度
1	往路： 北 ⇒ 南	32.96 秒	109.22 km/h
2	復路： 南 ⇒ 北	35.06 秒	102.68km/h
3	往復平均	34.01 秒	105.95km/h

5-4-3 電池温度と内部抵抗

Table 5-7 は電源であるオキシライド乾電池®の、走行前および走行中ならびに走行直後の電池温度および内部抵抗の測定結果である（計測実施2例）。電源である電池は電力消費により内部抵抗が増加すると考えられたが、走行直後の内部抵抗測定では走行前より58.8%・59.0%に下がっていた。これは高負荷による温度上昇が内部抵抗を下げたと考えられる。また停止直後の電圧が停止3分後より僅か高いのは、回生制動により最大44.3Vの充電状態となり停車したためである。

Table 5-7 オキシライド乾電池®：電池温度および内部抵抗

	気温	電源ユニット： B1/2			電源ユニット： B2/2		
		電圧	内部抵抗	電池温度	電圧	内部抵抗	電池温度
電池装填時	29℃	41.39V	0.439 Ω	28.6℃	41.39V	0.448 Ω	28.6℃
加温後	27℃	41.35V	0.343 Ω	55.0℃	41.35V	0.352 Ω	55.0℃
走行前	27℃	40.99V	0.345 Ω	53.0℃	40.99V	0.354 Ω	53.0℃
最高速度時	27℃	27.0V	—	55.0℃	27.0V	—	55.0℃
走行終了直後	27℃	40.41V	0.203 Ω	60.0℃	40.42V	0.209 Ω	60.0℃
走行終了3分後	27℃	40.17V	0.232 Ω	67.0℃	40.18V	0.236 Ω	67.0℃

5-5 まとめ

本プロジェクトでは、小型電気自動車で乾電池による時速 100km/h での走行を目的とした電源システムの開発結果について述べた。動力源としての市販のオキシライド乾電池®の性能を検討し、その最適化条件を実験的に明らかにした。オキシライド乾電池®は温度上昇とともに出力電力が増加することが分かったが、一方、80℃を越えると安全弁が動作し電解液が漏れうることが判明した。そのため 60℃ を目標温度と定めて電池を使用することに決定した。

オキシライド乾電池®を 60℃ で使用する場合、室温での使用に比べて 27% の出力増が可能となるため、プロジェクトの目標である 1km の区間を平均速度 100 km/h で走行するためには 192 本の電池で足りることがわかった。メーカー発表から概算した電池の必要本数は 400 本であったので、結果として総重量で 5.3kg (5.3%) の軽量化を達成できた。

第 4 章【ニッケル系一次電池（オキシライド乾電池®）を動力源とした目標時速 100km の小型電気自動車の動力設計】[Ashida.T.ほか(2007-a)] で述べた軽量化車体および動力系の効率化と、本研究結果である電池の効率化を合わせることで、本プロジェクトで開発された電気自動車は 1km の計測区間を平均時速 105.95km/h を記録することができ、この記録は【ギネスブック：2008 年度版】へ掲載された。また、それに先立つ走行テストにおいて同乾電池による最高速度は 115.9km/h に達した。

この研究により電池の持つエネルギーを有効に利用するためには、内部抵抗の低減が最も重要な要素であると言える。

今回の研究に用いた一次電池をエネルギー源とする電気自動車の研究は、従来の電気自動車普及の最大の問題と言える充電時間の長さという欠点を持たないため、本研究の結果は、今後の新しい電気自動車システム開発への可能性を示すものである[日本電動車輛協会(2003)]。

$$\eta P = v(ma + kv^2 + L) \quad (3)$$

第6章 電気自動車における速度変化特性と使用電力との関係

6-1 概説

自動車の性能評価においてその最も関心のあるところは加速、減速である。自動車における発生出力から実際に得られる速度を予測することは、自動車設計にとって極めて重要な要素である。近年では燃費の良し悪しが自動車の性能を大きく左右するようになり、エネルギー効率の高い電気自動車も多く開発されている。しかし、電気自動車は一充電距離の短さ、充電時間の長さ等の問題から一般的な普及には至っていない。一方で電気自動車ではその駆動電力は刻々と電圧と電流で簡単に測定することが出来るという、内燃機関にない優れた特徴がある。内燃機関自動車においては、発生出力を数値として直接得ることは容易ではない。従って、駆動電力から自動車の速度変化特性を予測することが可能であれば、その設計に資するところが大きいと考えられる。本章では、自動車の走行性能を示す「ころがり抵抗」、「空力抵抗」の値[Chanほか(2001)、Nasukawaほか(1993)]を使って自動車の加速度を駆動電力から求める計算式を導きだした。この式では、駆動電力が負、すなわち回生制動を行ない、減速力が車両に働いた場合でも適用することが可能である。得られた式を使い、第4章で製作した電気自動車走行時の速度特性予測に適用し、理論的予測との良い一致が見られたことを述べる。

6-2 EVにおける加速度を与える式の導出

ある時刻 t において、モータへの投入電力 P [W] のもとで電気自動車が v [m/s] で走行しているとき、微小時間 Δt において加速度 a [m/s²] が得られたとする。このときエネルギー保存の式はモータの効率を η とし、次式で表される。

$$\eta P \cdot \Delta t = v(kv^2 + L) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} m [(v + a \cdot \Delta t)^2 - v^2] \quad (1)$$

$$= v(kv^2 + L) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} m (2av \cdot \Delta t + a^2 \Delta t^2) \quad (2)$$

となる。ここで2次の項 $\Delta t^2 = 0$ とすると式(2)は

$$\eta P = v(ma + kv^2 + L) \quad (3)$$

この式を

$$\eta P = v(ma + kv^2 + L) \quad (3)$$

となる。ここでは空気抵抗係数 L は速度に関係しない走行抵抗であり、転がり抵抗と勾配抵抗に相当する。

次に効率 η について考える。直流ブラシレスモータを含む直流モータの場合、損失の多くの部分は銅損である。したがって、効率 η は効率の定義より次式で与えられる。

$$\eta = \frac{P - I^2 r}{P} \quad (4)$$

ここで I は電流、 r は巻線抵抗値である。交流モータにおいては鉄損も含めた等価的な値として r を扱う。これを (3) 式に代入すると

$$P = I^2 r + v(ma + kv^2 + L) \quad (5)$$

となり、入力した電力はモータ等による銅損と走行、加速に必要なエネルギーに変換されることがわかる。

直流モータの逆起電力 E [V]、流れる電流 I [A] と自動車の速度 v [m/s]、発生する力 F [N] の関係は次のようになっている。

$$E = \frac{Ka \phi N}{R} v = Kv \quad (6)$$

$$F = \frac{Ka \phi N}{R} I = KI \quad (7)$$

ここで Ka は直流モータ固有の電機子定数であり、 ϕ は電機子にかかる磁束、 R はタイヤの半径、 N はギアなどによる減速比である。

(7) 式を (5) 式に代入すると

$$P = \frac{r}{K^2} F^2 + v(ma + kv^2 + L) \quad (8)$$

となる。このとき F は運動方程式より次式で表される。

$$F = ma + kv^2 + L \quad (9)$$

この式を代入すると (5) 式はつぎのようになる。

$$P = \frac{r}{K^2} (ma + kv^2 + L)^2 + v(ma + kv^2 + L) \quad (10)$$

上式は、ある速度 v で走行中の車両に入力電力 P を与えたときの自動車の得る加速度 a を与える式である。

式 (10) は駆動電力から加速度を求める次式に変換できる。

$$a = \frac{+K\sqrt{v^2K^2 + 4rP} - (2krv^2 + 2rL + vK^2)}{2mr} \quad (11)$$

式 (11) によって、ある時刻における速度、入力電力がわかればその時刻での加速度が推定できる。この式には正負記号 \pm が存在するが、 $+$ は正転運転、 $-$ は逆転運転を意味する。

式 (7) において、電力 $P < 0$ の条件も許される。この負の電力は電源装置への回生エネルギーであるとみなせる。ここで、根号内は正であるという条件から、次式が得られる。

$$P > -\frac{vK^2}{4r} \quad (12)$$

つまり、ある速度 v において、回生できるエネルギー範囲は $0 > P \geq -\frac{vK^2}{4r}$ であり、式

(12) の条件で加速度がもっとも小さくなる。

6-3 必要電力

式 (10) を変形すると

$$P = \frac{r}{K^2} \left[a + \frac{1}{2m} (2kv^2 + 2L + \frac{vK^2}{r}) \right]^2 - \frac{v^2K^2}{4r} \quad (13)$$

この式から、ある加速度 a を得るために必要な電力 P を求めることができる。

式 (13) より必要電力 P は加速度 a に対し下に凸であり、

$$a = -\frac{1}{2m} \left(2kv^2 + 2L + \frac{vK^2}{r} \right) \quad (14)$$

の時、最も小さくなる。つまり最も回生エネルギーが大きくなる。

式 (10) より

$$P = \frac{r}{K^2} (kv^2 + L + ma)^2 + v(kv^2 + L) + mva = Pr + Pv + Pg \quad (15)$$

$$\text{モータによる損失} \quad Pr = \frac{r}{K^2} (kv^2 + L + ma)^2$$

$$\text{走行抵抗による損失} \quad Pv = v(kv^2 + L)$$

$$\text{獲得したエネルギー} \quad Pg = mva$$

とすると、加速、減速の効率を導くことができる。

次式における加速時の効率 η_a とは、入力電力がどれだけ効率よく自動車の加速に寄与しているかを示している。

$$\eta_a = \frac{Pg}{P} = \frac{Pg}{Pr + Pv + Pg} \quad (16)$$

次式の減速走行の効率 η_d は、入力電力がどれだけ効率よく電源装置に回生されているかを示している。

$$\eta_d = \frac{P}{Pg} = \frac{Pr + Pv + Pg}{Pg} \quad (17)$$

式 (16) (17) を加速度 a で微分し、その (式) 値が 0 となる時、速度 v で定数 K における効率が最大となる加速度である。

ここで K は式 (6) (7) より $K = \frac{Ka\phi N}{R}$ であるので、減速比 N や磁束 ϕ を変えるこ

とで K を変えることが可能である。この a は K と v の関数であり、変形して横軸に加速度 a 縦軸に K をとれば、ある速度 v の時において、必要とする任意の加速度を得るためのもっとも効率の良い K を求めることが可能となる。

6-4 時間変化する駆動電力から速度プロファイルを得る方法

本節では、上式で得られた駆動電力 P と加速度 a の関係を利用して、実際の走行データからその式の正確さを検証する。データとしては、第4～5章に述べた、乾電池で時速 100km を走破したときのものを使用する。

6-4-1 K, K_e, r の決定

6-4-1-1 モータ抵抗 r の導出

直流モータの回転数 f [rps]と逆起電力 E [V]との関係は、定数 K_e を使って次のように表される。

$$E = K_e \cdot f \quad (18)$$

この K_e を逆起電力係数[V · s/rad]という。

モータの電機子抵抗を r とすると、入力電圧 V のときの回転数 f は電流の関数で求めることができる。

$$E = V - Ir \quad (19)$$

式 (18) を代入すると

$$f = \frac{V - Ir}{K_e} \quad (20)$$

以下に、実際に使用したモータ特性および取得データである、第4章 Fig.4-15 および Fig.4-24 を用いて具体的な計算をおこなう。Fig.4-15 のモータ特性より、無負荷のとき入力 24V、電流 0A での回転数は 30[rps]だから、式 (20) より

$$K_e = \frac{24}{30} = 0.8 \quad (21)$$

となる。

一方、実際の走行時電流 I は一つのモータあたり 20~25 A である。この領域におけるモータ損失は、電機子抵抗を r としたとき、銅損 $I^2 r$ が主体的である。今、電圧 24V、電流 I [A]での入力電力は $24I$ [W]であらわされる。第4章 Fig.4-15 のモータの特性は、入力電力 P に対するモータトルクと回転数のかけ算から得られる回転出力 P_0 との比率、すなわちモータ効率 η [%]を示している。電機子抵抗 r は次式で求められる。

$$r = 24I(1 - 0.01\eta) / I^2 = 24(1 - 0.01\eta) / I \quad (22)$$

電流 I が 20, 25, 30 [A] における効率は第 4 章 Fig.4-15 からそれぞれ、90 %, 88 %, 86 % である。その結果得られる抵抗値は、それぞれ、0.12, 0.092, 0.11 [Ω] である。この平均をとって、電機子抵抗 r として

$$r = 0.11 \text{ } [\Omega] \quad (23)$$

が得られた。

6-4-1-2 K の導出

直流モータが回転数 f [rps] で回転しているとき、タイヤの半径を R [m] とすると自動車の速度 v は減速機がない時

$$v = 2\pi R \cdot f \quad (24)$$

であり、式 (18) の f に代入するとモータ逆起電力と自動車の速度の関係式は

$$E = \frac{K_e}{2\pi R} v = Kv \quad (25)$$

資料よりタイヤ半径は約 0.17[m] によって K は

$$K = 0.72 \quad (26)$$

となる。

ここで得られた r 、 K_e 、 K を用いることによって、入力電力に対する自動車速度の具体的な関係を得ることが出来る。

6-4-2 投入電力から速度プロファイルを得る計算の例

式 (11) を用いると、実際の走行データから、投入電力と計算で予測される速度プロファイルの関係を計算し、実測値と比較することが可能になる。ここでは単三乾電池で人が乗って速度 100km/h を得るプロジェクトで得られたデータ第 4 章 Fig.4-24 を用いた。使用した EV の諸元は第 4 章 Table4-1 を用いた。使用した EV の走行パラメータは第 4 章 Table4-2 を用いた。走行データを使用した車両は第 4 章 Fig.4-1 の写真の EV である。

EV に投入された電力を用い、式 (11) を用いて加速度 a を時々刻々計算した。 Δt 秒後の速度 v' は次式によって与えられる。

$$v = v + a \Delta t \quad (27)$$

等価的な電機子抵抗 r は第 4 章 Fig.4-15 のモータ特性表から式 (18) を用いて先に導出した 0.11Ω を用いた。Fig-6-1 は、計算によって得られた速度プロファイルと、実測値とを表したものである。これらは良い一致を示していると言える。しかし、減速時においては両者に違いが見られる。この差は、機械式ブレーキによる熱損失分を表している。それは第 4 章 Fig.4-25 を見ると明らかである。減速時のデータを見ると、その時電流および電力が負の値であり、回生制動中がわかるが速度は計算結果より早く減速しているのがわかり、この差が機械式ブレーキによる減速分である。

回生制動によって得られた電力 P から、EV の減速過程も再現することが出来る。そのことは、停止直前まで回生制動だけで減速をした走行においては、Fig.6-2 に示すように実測値と計算値のきわめて良い一致が得られたこと明らかである。すなわち、この場合は、停止する直前の 150 秒以降に初めて機械式ブレーキが使われたことが分かる。

6-5 結言

式 (11) は加速度と速度の関係を示したものである。任意の時刻における速度とその時の投入電力を与えることによって、速度変化を計算することが出来る。速度の積分によって、最終的に総走行距離が得られる。自動車に搭載した総電力量 $W[J]$ を与えることで、加減速を含む任意の速度プロファイルに対し、走行可能時間や距離をこの式を使って計算することが出来ることがわかった。あるいは、時間変化する速度プロファイルを最初に与えれば、その車がそれだけの時間走行するためにどれだけの電力量あるいはバッテリー搭載量が必要であるかを求めることが出来る。

またモータに与える磁界の強さや減速比の決定において、どのように最適化すれば効率の改善や出力向上に有効であるかをシミュレーションすることが可能である。

本章の結論は、電気自動車における電力使用の時間変化を与えることにより、速度プロファイルを得るための一般式を導き出した。その式を実際のデータに適用することによって、速度プロファイルの理論的予測と実測値が良く一致することを示し、本論文で得られた式の正当性をあきらかにした。本手法は、今後の電気自動車における性能確認や、電気自動車設計時において性能予測など、有用性が高いと考えられる。

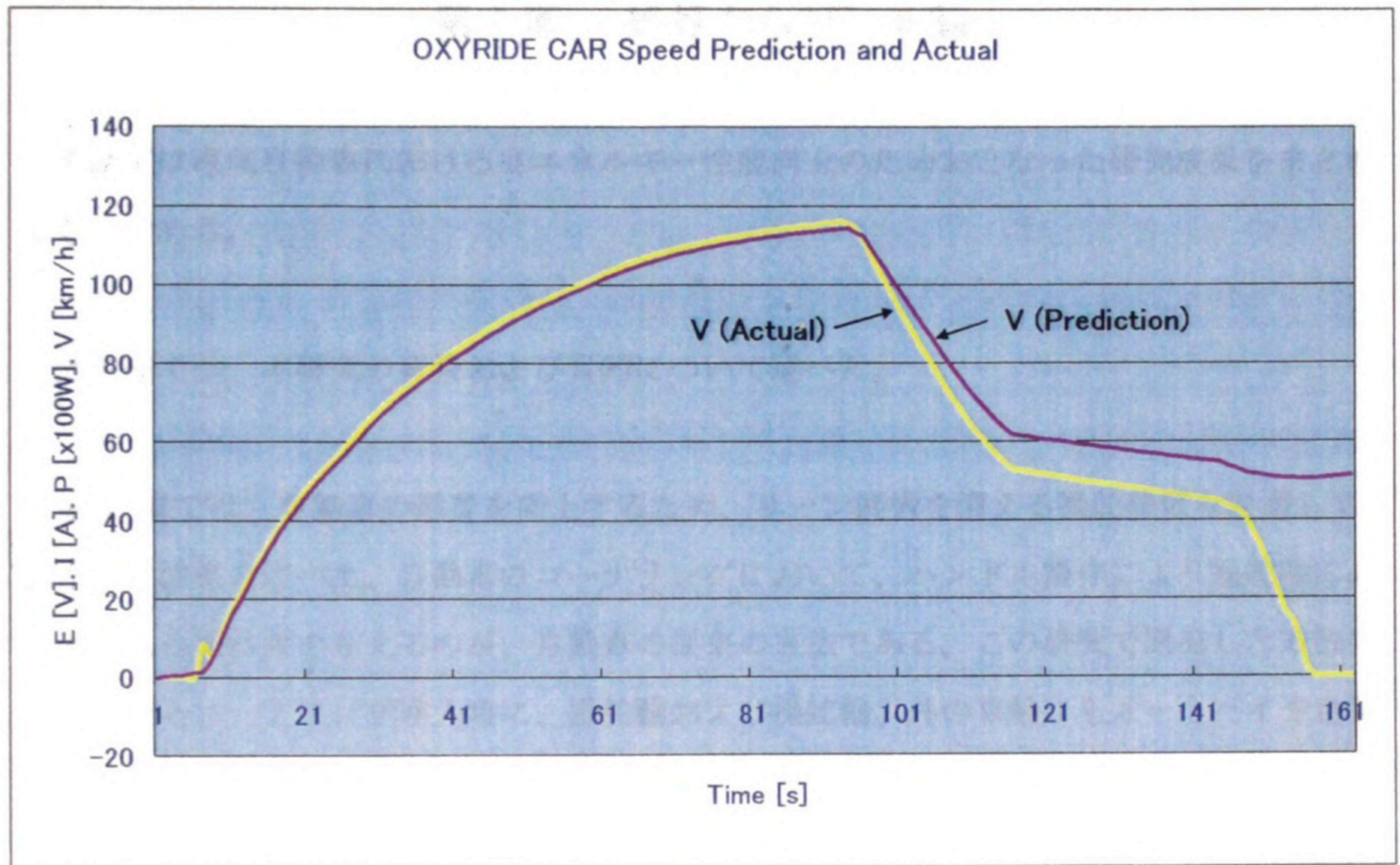


Fig.6-4 速度プロファイルの実測値と理論的予測値の変化を示す図

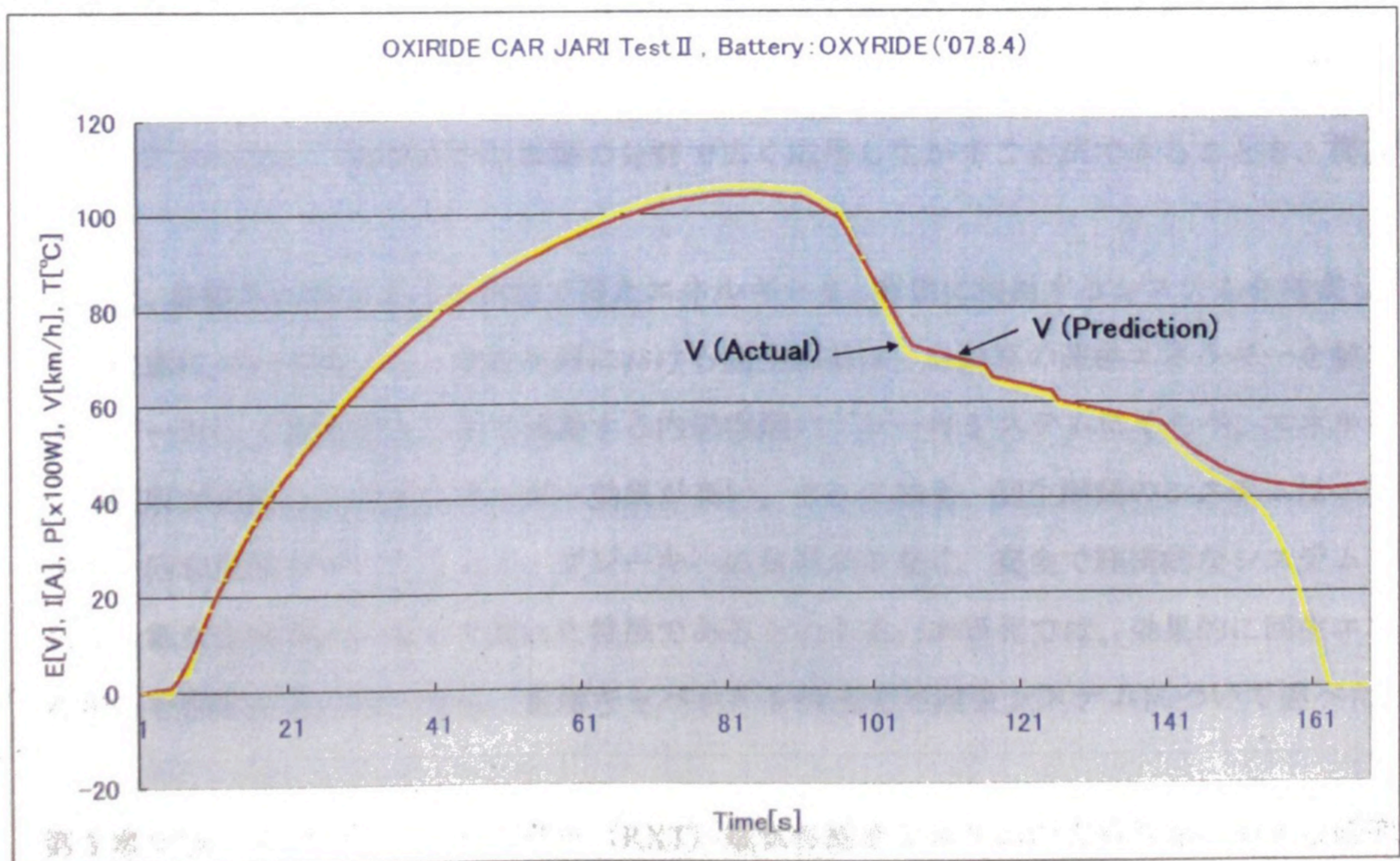


Fig.6-5 別の速度プロファイルに対する実測値と理論的予測値の変化を示す図

第7章 総括ならびに結論

本論文は電気自動車における省エネルギー性能向上のためおこなった研究成果をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、自動車の燃費を向上するため、リーン機構を備える操舵装置を考案して、試作した結果を述べた。自動車のコーナリングにおいて、ハンドル操作により操舵輪に必要とされる切れ角を与えるのが、自動車の従来の方法である。この研究で開発した方法はそれに加えコーナリング進入時に、操舵輪および操舵輪以外の車輪にもオートバイや自転車などの2輪車がコーナリングする時のように、車体および車輪をコーナの内側に必要量倒す(リーンする)ことにより、スムーズなコーナリングをおこなおうとするものである。

自動車がオートバイや自転車のようにスムーズなコーナリングをおこなうことによって、コーナリングによる速度低下が抑えられ、エネルギーのロスが少ない省エネルギー自動車となりうることを実際の走行データによって明らかにした。

この研究により得られた技術は、ガソリンエコランやEVエコランの分野に留まらず、マイクロカーと呼ばれる第一種原動機付3輪車・第一種原動機付4輪車や電動車椅子およびセニアカーなど、比較的小型車輛の分野で広く応用し生かすことができることを、提言した。

また、自動車における回生制動で得たエネルギーを、有効に利用するシステムを考案し、その性能について述べた。電動車両における回生制動は、自動車の運動エネルギーを熱エネルギーとして放出することで制動する内燃機関のブレーキシステムにくらべ、エネルギーの回収が可能のため省エネルギー効果が高い。それに加え、回生制動のシステムはエネルギー回収効果だけに止まらず、ブレーキへの負担が少なく、安全で経済的なシステムであり、電気駆動車両の極めて優れた特徴であるといえる。本研究では、効果的に回生エネルギーを回収するために電気二重層キャパシタを併用する回生システムについて述べた。

第3章では、レンジエクステンダー(RXT)電気自動車システムの実用性能に関する研究結果について述べた。

電気自動車の欠点の一つである 1 充電走行距離の短さを改善し、実用化する方法が模索されている。その一つの方法として、レンジエクステンダー (RXT) があげられる。しかし、プラグインハイブリッド車 (PHEV) や、バッテリーだけの電気自動車 (EV) に対する得失の定量的な検討は行われていない。本論文では、実際にバッテリー電気自動車 (EV) と被けん引発電トレーラを製作し、RXT を構成し、その走行データから、EV、PHEV との定量的な比較を行うとともに、製作したシステムに対し、シミュレーションを行なった。その結果、1 週間のうち 6 日は 20km 走行し、1 日は 100km 走るといふ実走行に近い使用パターンに対し、RXT が優れたシステムであることを始めて明らかにした。被けん引車である発電トレーラは災害時などにおいて移動式緊急発電機として利用でき、社会的な価値についても述べた。

第 4 章および第 5 章では、電気自動車が高効率で走行できる乗物であることを実証し、周囲にアピールするため乾電池で時速 100km/h 以上の高速走行が出来ることを示すプロジェクトと、その研究成果について述べた。

第 4 章では、動力システムについて述べ、一人乗りの小型電気自動車を製作し市販のオキシライド乾電池[®]を用い、目標とした 1km の計測区間で平均時速 105.95km/h を記録できた事を示した。その電気自動車の具体的内容として、車体の空力特性の最適化による空気抵抗や加速抵抗の低減、および新素材を使い軽量化を徹底した車体の製作について述べた。また専用に開発した、広い電流範囲で 90%前後の高効率を達成、駆動系伝達効率 100%のダイレクトドライブ (D-D) 方式のモータを製作について述べた。更に専用に開発した転がり抵抗が従来の自転車タイヤの約 50%で、軽量を目指して開発したタイヤの構造および性能について述べた。

第 5 章では、動力源となるオキシライド乾電池[®]を用いた電力システムの設計について述べた。使用する乾電池の環境の最適化を図ることで、電池の内部抵抗を下げ短時間でも電力を効率よく取り出せることに成功。その結果、2007 年 8 月 4 日、財団法人 日本自動車研究所 城里テストコース (茨城県) において、走行試験時に最高速度 115.9km/h を記録。速度記録走行会では 1km 計測区間の往路・復路で平均速度 105.95km を達成。記録した速度がギネス記録として認定された。

目標とした時速 100km/h を単一の効率的出力に内部

192 本で設計通り達成でき、電池の持つエネルギーを述べていることを述べた。

第6章では、電気自動車における速度変化特性と使用電力との関係についての計算式を導き出し、速度プロファイルの理論的予測と実測値が良く一致することを示し、その有効性をあきらかにした。

電気自動車は、その駆動電力を刻々と電圧と電流で簡単に測定することが出来るという、内燃機関にない優れた特徴がある。内燃機関自動車においては、発生出力を数値として直接得ることは容易ではない。電気自動車において駆動電力から車両の速度変化特性を予測することが解析的に可能であることをあきらかにした。すなわち与えられた車両の走行性能を示す「ころがり抵抗」「空力抵抗」の値を使うことによって、車両の加速度を駆動電力から求める計算式を導きだした。この式では、駆動電力が負、すなわち回生制動によって減速力が車両に働いた場合でも適用することが可能である。この研究で得られた式を使い、実際の車両走行時の速度特性予測に適用し、理論的予測との良い一致が見られたことを示した。

謝 辞

本研究論文の作成にあたり、ご多忙にも拘らずどのような時にも懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました 大阪市立大学 大学院工学研究科 電子情報系専攻 南繁行教授には、今の自分の気持ちを最大限表す言葉を持ち合わせません。「心より感謝申し上げます ありがとうございます」この月並みな言葉でお許しください。審査をご担当いただきました化学生物系専攻 小槻勉教授、機械物理系専攻 澤田吉裕教授の先生方には、私の拙い文章の論文審査にご苦勞をおかけしたと思います。そのうえ『電気自動車工学』とまで言っていただきました「本当にありがとうございます」。電子情報系専攻 辻本浩章教授、向井孝彰教授の先生方には、本論文を纏めるにあたりご助言をいただき、不十分ながらも成し遂げることができました「ありがとうございます」。機械物理系専攻 橋本敏教授には身に余る賛辞を頂き光栄です「ありがとうございます」。

また本研究のプロジェクトに参加・協力いただきました 大阪産業大学 工学部交通機械工学科 藤田久和先生、同じく大阪産業大学 短期大学部 自動車工学科 才原篤先生。株式会社ミツバ SCR プロジェクト 内山英和様。ナショナルタイヤ株式会社 尾谷昌彦参与の皆様方には、今回もまた公私共々ご理解ご協力を頂き「ありがとうございます」とても言葉では言い尽くせません。

籠谷正則学長、山田修副学長を始め大阪産業大学クリエートセンターご関係の皆様「ありがとうございます」お1人お1人のお名前を挙げるべきですが、失礼をお許しください。

急な実験や計算で、陰に日向に支えていただきました 大阪市立大学 南研究室の学生の皆さんには大変お世話になり感謝しています「本当にありがとうございます」。

電気自動車の将来に理解を示し EV 用バッテリーに夢をお持ちの、株式会社 光洋 岸上億則社長には、電気自動車へのシリコンバッテリーの提供を含め公私共々ご迷惑をお掛けしています。この短い文中では、とてもお礼を言い尽くせるものではありません「本当にありがとうございます」。

電気自動車のラリーやエコラン競技への参加で、我が team TGM Y Ashida のチームメンバーとして、いつも行動を共にしてくれる、気のおけないメンバーの皆様、あなた達のおかげで沢山のデータが蓄積でき、本論文に生かすことができました「本当にありがとうございます」。

最後に家族にお礼を述べたいと思います。いつも愚痴も言わず好き勝手を許してくれています妻の泰子には、今後とも頭が上がりません「本当にありがとう」。長男の剛と幸代夫妻には自分の論文のように心配してくれました「二人ともありがとう」。君たちの存在がなかったら論文も完成していないでしょう。最後に次男の昌和は随分迷惑を掛けました。何でオヤジが学生 - 大学院？と、思っていた筈です。それでも聞いた疑問に何も言わず付き合ってくれました「いつもありがとう」。家族の支えがあってこの論文が書けました「みんな本当にありがとう」。

皆様、これで終わりではありません。これからも末永くご指導ご鞭撻の程、よろしく願いいたします。

芦田 隆

参考文献

(あいうえお順に記載)

芦田隆、“省エネカーにリーンシステムは有効か” 省エネルギーNo2、日本省エネルギー研究会収録、pp. 33-36 (1994)

芦田隆、“操舵装置”、特公平 7-94228、(1995)

芦田隆、“電動車の回生システム”、特開平 10-80007、(1998)

芦田隆、“目指したのは普通の乗用車” 第5回研究発表全国大会概要集、電気自動車研究会、pp. 11-12 (1999)

芦田隆、“四国 EV フェスティバル 2000in 高知” ソーラー&電気自動車に関する研究集会、東海大学、pp. 38-44 (2002)

芦田隆、“自作電気自動車で走り出そう” 電気自動車・燃料電池車・ソーラー製作講習会、日本太陽エネルギー学会、pp. 21-30 (2007)

Ashida.T., “Development of a Trailer-type Series Hybrid System to Extend Driving Range of EV.” , The World Electric Vehicle Association Journal, Vol. 1, Japan Automobile Research Institute., pp. 197-204 (2007)

Ashida.T., S.Minami., H.Fujita., A.Saihara., H.Uchiyama., M.Odani., “Designing Engines of Compact Battery-cars for the Target Speed of 100km/h Using Nickel-system Primary-cells (Oxyride Dry-cell Batteries) : Part 1 Optimization of the Body.” , Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 5, No. 2, pp. 993-1005 (2007-a)

Ashida.T., S.Minami., “Designing Compact Battery-cars for the Which Target Speed is 100km/h Using Nickel-system Primary-cells (Oxyride Dry-cell Batteries) : Part 2 Battery System Optimization.” , Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 5, No. 2, pp. 1007-1007 (2007)

Ashida.T., D.Tanaka., S.Minami., “A Method to Determine the Velocity Profiles from the Power Consumption of Electric Vehicles.” , Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 5, No. 2, pp. 1027-1032 (2007-b)

Adrianus, B.C., T. Fabio, C. Theophanis, and G. Beauzemont, Charging Infrastructures for Tomorrow's Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Proc. EVS-22, pp. 2236-2245 (2006)

Alberto Calliano, “Bertone Z.E.R.,Auto&Design” , Auto&Design Advertising, pp. 43-50 (1995)

ALECo, “ALECo-BATTERY カタログ”、株式会社光洋、(2002)

池上敦哉、“ソーラーカー, エコノムーブ基礎講座 - 設計からは知らせ方まで”、日本太陽エネルギー学会、pp. 1-9 (2007)

EV world, “ベルトローネ ZER”、二玄社、pp. 104-106 (1995)

“EV nut.com ホームページ”、URL : http://www.evnut.com/index.htm/rav_longranger.htm、(参照 2006-10)

“EV Maine.org ホームページ”、URL : http://www.evmaine.org/html/ev_trailers.html、(参照 2006-10)

Water Planet Tomorrows, “History of Motorcar” , <http://waterplanet.homeunix.net/%7eohno/index.html>, (参照 2007-5)

運輸省、“道路運送車両法” 近畿地区自動車整備連絡協議会、(1996-a)

運輸省、“改造自動車等取扱いの解説” 交文社、(1996-b)

M. O’Keele, T. Markel, Dynamic Programing Applied to Investigate Energy Management Strategies for a Plug-in Hybrid, Proc. EVS-22, pp. 1035-1046 (2006)

Karbowski, D., A. Rousseau, S. Pagerit, and P. Sharer, Plug-in Vehicle Control Strategy: From Global Optimization to Real-time Application, Proc. EVS-22, pp. 274-286 (2006)

熊野学、“尽きることのない新技術, 新工夫”、CAR GRAPHIC、二玄社、(1992)

木村常在、“乾電池の内部抵抗が影響する現象”、聖徳大学 紀要 6、pp. 1-9 (1974)

近畿運輸局、“保安基準適合検討書”、大阪主管事務所、(1996)

木村英樹 ほか、“エコ電気自動車のしくみと製作”、日本太陽エネルギー学会編、オーム社、pp. 44-47 (2007)

佐藤員暢、高行男、“EV・電気自動車”、山海堂、(2002)

CG 編集部、“充実期のマイレージマラソン”、CAR GRAPHIC、二玄社、(1993)

JIS C8500、“一次電池通則”、日本規格協会、pp. 1-10 (2006)

シェル石油株式会社、CAR GRAPHIC、“SHELL-CAR GRAPHIC マイレージマラソン大会規則書”、(1981)

自動車工学編集委員会、“自動車工学”、山海堂、(1988)

清水浩、“電気自動車のすべて”、日刊工業新聞社、(1992)

新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会、“次世代自動車用電池に向けた提言”、新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会、(2006)

SOLECTRIA、“SOLECTRIA AC DRIVE SYSTEM”、Catalog, SOLECTRIA、(1997)

ダイハツ、“EV バン V-S90V バキュームポンプ”、パーツリスト、ダイハツ工業株式会社、(1997)

Chan, C. C., K. T., Chau, “Modern Electric Vehicle Technology”, Oxford Science Publications, (2001)

Thomas B. Gage, “Low-Emission Range Extender for Electric Vehicles”, AC Propulsion Inc, (1997)

豊田工機、 “PS 用電動ポンプ ”、カタログ、豊田工機株式会社、(1996)

Nasukawa, K., Y. Miyashita., M. Shiokawa, “Cruising Performance and the Testing Method of Automobiles (in Japanese) ” , Sankaido, (1993)

日本磁性材株式会社、 “スーパーE コア”、

URL : <http://www.nihonjiseizaikogyo.co.jp/nihomjiseizaikougyo-p2/htm>, (参照 2007-5)

日本電動車輛協会、 “電池着脱式電気自動車を用いたカーシェアリングシステムに関する調査研究”、
日本電動車輛協会、(2003)

日野自動車工業株式会社、 “車両用電源調整回路”、特開平 4-271209、(1992)

日渡良爾、 “研究報告 L05008 プラグインハイブリッド車導入が日本の電力需要へ及ぼす影響”、
財団法人電力中央研究所 (2006)

NEWAGE, “STAMFORD AC GENERATORS”, Catalog, NEWAGE, (1997)

富士重工業株式会社、 “車両用電源装置”、特開平 9-98514、(1997)

藤田久和 ほか、 “OSU model S’の開発と 2 輪駆動の走行性能について”、日本太陽エネルギー学会、pp.
17-22 (2006)

本田技研工業株式会社、 “ホンダ・エコノパワー燃費競技 競技規則書”、(1981)

ホンダ、 “HONDA GX620 V-TWIN”、カタログ、本田技研工業株式会社、(1993)

ホンダ、“ホンダ CIVIC” ホンダ CIVIC カタログ、本田技研工業株式会社、(1997)

増原憲一、“車両の操向装置”、特開平 1-168585、(1989)

Max Press、CAR GRAPHIC `80-10 “ミニマムの追求”、二玄社、(1980)

松下電器産業 (株)、“乾電池ホームページ”、URL : <http://national.jp/product/conveni/battery/>,
URL : <http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/AAC4000/AAC4000CJ216.pdf>, (参照 2007-5)

御堀直嗣、“AC Propulsion Honda (EV world)”、二玄社、(1995)

Miyashita.K., “Comparative Study between Shikoku EV Rally in Japan and Tour de Sol in USA”,
Journal of Asian Electric Vehicles, Vol.1, No.1, pp. 367-372. (2003)