

高い動力性能を持つ電気自動車 Eliicaの開発

Development of High-Performance Electric Vehicle

Eliica



吉田 博一*
Prof. Hiroichi YOSHIDA



清水 浩**
Prof. Hiroshi SHIMIZU

A new electric vehicle named the "Eliica" was developed. As element technologies, a lithium-ion battery, permanent magnet type motor, and inverter with IGBT were applied. As new body component technologies, in-wheel motors, a component built-in frame, and tandem wheel suspension were invented. Although the Eliica is a five-passenger sedan, it recorded a maximum vehicle speed of 370 km/h and an acceleration time of 7.0 seconds from zero to 160 km/h.

Key Words: electric automobile, environment, in-wheel motor, lithium-ion battery, Tokyo Motor Show, challenges for driveline, outer ring rotation hub-bearing

1. はじめに

地球温暖化は現実の問題として考えざるを得ない状況である。

地球温暖化の要因である二酸化炭素発生のうち、車が占める割合は約20%に達しており、かつ、大気汚染物質の主な発生源も車によっている。

このため、これまでの内燃機関自動車に代る自動車として、ハイブリッド車、燃料電池自動車、電池を電源とする電気自動車の普及に向けた取組みが世界中でなされている。

これらのうち、ハイブリッド車については、すでに製品化がされ大量生産に至っている。これは内燃機関自動車にモータアシスト機能を取り付けることにより省エネルギー化を図ったものである。

燃料電池自動車は正確には燃料電池を電源とする電気自動車と呼ぶべきであるが、2000年を境に開発の大きなブームがあった。そのきっかけは1996年にダイムラークライスラーがカナダのバラーード社に資本参加したことによる。

一方で、二次電池を電源とする自動車がいわゆる電気自動車と呼ばれていたが、これは古い歴史があるにもかかわらず普及に至っていない。しかし2000年に経済産業省の主導で行われたニューサンシャイン計画で、大型リチウムイオン電池の開発に成功し、これが電気自動車用電池として有望であることから、これを用いた車の可能性が再び大きくなった。

筆者らは、これらの自動車のうちリチウムイオン電池を電源とする電気自動車が環境負荷の少なさ、新しい特徴が付加可能であることの原因から、きわめて将来性が高いと考えてきた。それを証明するための車として、KAZと名付けた車を2002年に完成させた。この車の基本概念を踏襲し、より現実性を持たせた車としてEliica(エリーカ)と名付けた車を開発した。EliicaはElectric Lithium-Ion Battery Carの頭字語であるが、これまでのイメージの電気自動車とは全く異なる性能と機能を有することから、新しくこのようなネーミングとした。

なお、Eliicaプロジェクトは光洋精工株式会社を始めとする38社の企業による共同プロジェクトである。

本文ではEliicaの開発目標、基本技術、開発過程を中心に述べることを目的とする。

2. Eliicaの開発目標

筆者らはこれまで8台の電気自動車の開発に関わってきた。その目標としてきたことは将来、これを実用的な車として社会に定着させることである。

開発の当初は環境に優しい車は、性能さえこれまでの内燃機関自動車と同等であれば、普及は可能と考え、この部分を目指して開発を行って来た。1991年に東京電力が中心になって開発したIZAのメンバーとして筆者らが加わったが、この時点

*慶應義塾大学 政策・メディア研究科 教授

**慶應義塾大学 環境情報学部 教授

で性能的には内燃機関自動車に劣ることはなくなった。しかし、その結果が社会を動かす為の十分なインパクトにはならなかった。

その理由として挙げられることは、新しい商品が社会に受け入れられるには新たな特徴が加わることが必要だということであった。

この新しい特徴を生み出すために、車体構造をこれまでの内燃機関自動車とは異なったものとするべきであるとの認識で、I Z Aに続く車を開発した。

そして2002年に完成させたK A Zという車で集積台車という概念にたどりついた。

この概念は図1に示すように、(1)車輪の中にモータを挿入するインホイールモータ、(2)床下に中空のフレーム構造を作り、この中空空間に電池を始めとする主要な部品を挿入するコンポーネントビルトイン式フレーム、(3)大径の車輪を小径の2つの車輪に分割し、これら2つの車輪にかかる地面からの力を分散する機構とするタンデムホイールサスペンションである。

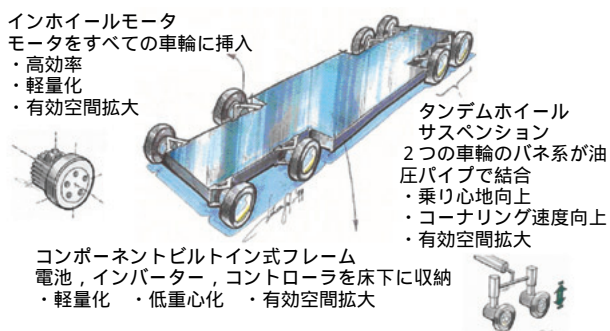


図1 集積台車という新しい概念の車体

Vehicle body with new integrated platform concept

本Eliicaは集積台車の概念をコンパクトにまとめ、普通乗用車に適用することによって、自動車技術としての汎用性と現実性および実用性を実現することを大きな目標にしている。

この目標に従ってEliicaは2台開発した。1台は高速型と名付けるもので、インホイールモータに挿入しているギヤのギヤ比を小さめにとり、最高速度を高くすることを意図したもので、もう1台はギヤ比を大きめにとり、加速度を重視したものである。

車としての実用性の点からは高加速型の方が有用であり、車の安全性を評価し、かつその能力を分かり易い形で表現する為に高速型の実現も重要と考えた。

車の用途については、セダンとスポーツカーの双方の特徴を併せ持つ車と定義した。今、乗用車の世界は3つの方向での商品化が図られている。

1つはセダン型で、通常の用途として広く使われている。車の愛好者向けには昔からスポーツカーがあった。最近スポーツユーティリティークル(SUV)の商品化も進んでいる。

これらの用途はこれまでの内燃機関自動車ではどちらかを優先させると、どちらかを犠牲にしなければならなかった。一方で、集積台車の概念を使うと、床面は広くなった上で8つのモータと床下の電池から大パワーを取り出すことが出来る。また、コンポーネントビルトイン式フレームによって重心が下がったことは乗り心地の向上と車体の安定性に効果がある。さらに、タンデムホイールサスペンションによって車が8輪化したことにより、悪路での乗り心地が著しく向上し、かつ、急カーブでのタイヤのグリップ力の向上にも大いに効果がある。

したがって、集積台車の概念を使えば、セダンに要求されてきた空間の広さと乗り心地が十分に満足できると共に、スポーツカーに要求されてきた高い動力性能と運動性能が実現出来る。

これらの特徴から、Eliicaではセダンでありながらスポーツカー以上の性能、かつスポーツカーでありながらセダンと同等あるいはそれ以上の広さと乗り心地を重視出来るという、両方の車に要求される性能と能力を余すところなく実現出来る車を目指すこととした。このように2つの車の特徴を併せ持つ車をここではクロスオーバー車と呼ぶ。

3. Eliicaの基本技術

Eliicaの基本技術は要素技術と車体構成技術に分けられる。ここで言う要素技術とは電池、インバータ、駆動用モータなどの電気自動車としての共通技術であり、車体技術とはこれらを組み合わせたインホイールモータ、コンポーネントビルトイン式フレーム、タンデムホイールサスペンションである。

3.1 要素技術

電池

電池にはマンガン酸リチウムを陽極に使用したりチウムイオン電池を用いている。ここでは高速走行用と高加速用にそれぞれパワーを重視したものとエネルギーを重視したものの2種類を使っている。その基本特性を表1に示す。

表1 Eliicaに用いたリチウムイオン電池の基本特性
Specification of a lithium-ion battery on Eliica

	1号車用	2号車用
全長, mm	170	170
全幅, mm	47	47
全高, mm	133	133
重量, kg	2.1	2.1
公称エネルギー密度, Wh/kg	41	72
公称パワー密度, W/kg	1500以上	700以上

同表のようにサイズ、重量は双方とも同じで、エネルギー密度とパワー密度がそれぞれ異なる。また、充電時間も異なる。同表に示した特性は電池温度25℃、定格充電電圧4.15Vの時のものである。電池温度を上げることによって、パワー特性は向上する。しかし、温度が60℃を超えると寿命特性に大きな影響を与える。充電電圧には同表に示したものよりも0.1V程度高く設定しても寿命その他に影響は無く、パワー密度、エネルギー密度はそれぞれ向上する。しかし、寿命に悪影響を与える恐れがあるため、通常は定格電圧までの充電で利用することが重要とされている。

Eliicaにおいてはこの電池を4個まとめたものを1モジュールとし、このモジュールを20個直列にしたものを1つの組電池としている。

さらにこの組電池を4組搭載している。各組電池からはそれぞれ2個ずつのモータに電力を供給する形式としている。このような形式とすることによりモータや電池のそれぞれに故障が生じたとしてもすぐに車が停止することは無く、結果的にフェイルセーフ性を高めることが可能である。

インバータ

インバータはスイッチング素子としてIGBTを用いたPWM制御方式である。その基本特性を表2に示す。このインバータはコンポーネントビルトイン式フレームに挿入する必要上、高さの制限がまずあり、さらには幅および長さにも制限を設けた。このため、表2に示すサイズでありながら、Eliicaが必要としているパワーを供給できる能力を有するものとするを可能とした。

本インバータのキャリア周波数は12kHzに設定した。これはモータの最高回転速度に対応するために十分高い周波数である。

また、本インバータの冷却方式は水冷とし、その冷却水の最大温度は50℃とした。

このインバータで制御するモータの最大トルクは100Nm、最高回転速度は12500min⁻¹、最大出力は80kWである。また、この条件でのモータの基底回転速度は6500min⁻¹となる。

表2 インバータの基本特性
Specifications of an inverter

	1号車用	2号車用
全長, mm	380	380
全幅, mm	300	300
全高, mm	150	150
重量, kg	17	17
最大出力容量, kW	80	80
最大入力電圧, V	360	360
最大電流, Arms	459	459
キャリア周波数, Hz	12	12

モータ

モータはNd-Fe型永久磁石を用いた同期式モータである。その極数とポール数はそれぞれ8極、12スロットである。

ロータはインナーロータ型で、磁石をその表面に貼り付け、強固に固定する表面貼付方としてある。その直径は114mm、長さは86mmで機械的最高回転速度は14400min⁻¹である。この最高回転速度に対して実用利用においては、最高回転速度を12500min⁻¹と設定してある。

ステーター巻線は集中巻方式を採用している。その巻線は直径0.9mmでH種の絶縁特性を持つものを採用している。特にこのステーターにおいては巻線方式に工夫を凝らし、占積率80%を実現している。

モータの放熱はケースの外側に取り付けられたファンによる自然空冷方式である。

その定格特性は40秒間の短時間定格で80kW、回転速度2400min⁻¹の連続定格で4kWである。

本モータの特性を表3にまとめてある。

表3 モータの基本特性
Specifications of a motor

	1号車用	2号車用
全長, mm	195	195
直径, mm	214	214
重量, kg	20	20
最大トルク, Nm	100	100
最大回転速度, min ⁻¹	12500	12500

3.2 車体構成技術

インホイールモータ

インホイールモータには3.1の で述べたモータを採用し、これにプラネタリーギヤによる減速技術、外輪回転式ハブベアリングおよびディスクブレーキを組み合わせて各車輪に挿入する構造としてある。プラネタリーギヤのギヤ比は1号車で

は3.257，2号車は6.923とした。

このインホイールモータは，その上下に取り付けたアタッチメントを介してそれぞれサスペンションのアップフレームとローアームに取り付ける構造となっている。

ディスクブレーキにはフローティングタイプのものを採用しており，このブレーキの後輪側にサイドブレーキが取り付けられている。

インホイールモータの全体の写真を図2に示す。

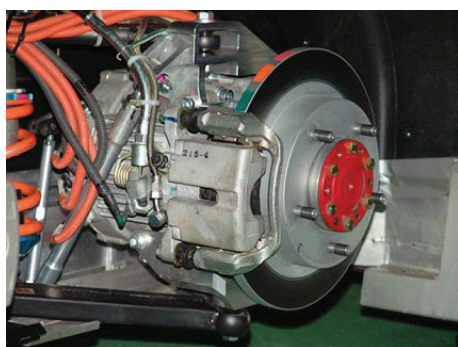


図2 インホイールモータの外観
Appearance of in-wheel motor

このインホイールモータでは高度な技術としてベアリングおよびオイルシールが多数使われている。

ベアリングについては，モータの軸受用，遊星ギヤのサンギヤおよび遊星ギヤ用，およびハブベアリングがある。これらの中で特に高い技術を要するのが遊星ギヤ用のベアリングである。この部分は小型のベアリングを超高速で利用することが必要である。そのために，ここには特別に設計したニードルベアリングが使われている。

オイルシールは各ベアリングのオイル漏れを防ぐために用いられている。その中でハブベアリングのオイルシールはブレーキディスクの内径およびハブベアリングからの出力をホイールに伝えるスピンドルの外径との取り合いから，極めて肉薄でかつ強度の強いものを本ホイールモータのために開発をした。

これらのベアリングおよびオイルシールの設計および試作は光洋精工株式会社によるもので，同社の技術力の高さを実感する重要な技術である。

コンポーネントビルトイン式フレーム

コンポーネントビルトイン式フレームは中央部の電池収納部分と，側部のインバータ収納部分から成っている。また電池収納部分の両脇にはサスペンションなどのアタッチメント取り付け用に矩形のせり出しを設けている。

電池収納部分と矩形のせり出しはアルミの挿し出し成形によって形成した中空状の薄肉型構造体を4本まとめて熔接している。その断面の構造図を図3に示す。同図で示すように上面，下面は2.5mm厚とし，側面は2.5mmとすることによって剛性を確保していながら軽量化を図る構造としてある。

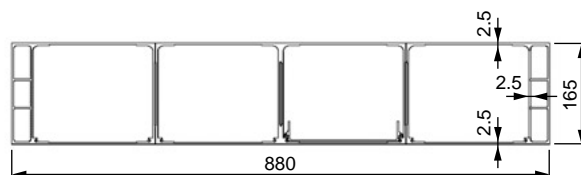


図3 コンポーネントビルトイン式フレームの断面図
Cross section of component built-in frame

コンポーネントビルトイン式フレームへの電池の挿入はトレイ上に電池を固定し，このトレイの下部に取り付けた突起とフレームの中空空間内部に取り付けたこの突起をはさみ込む2本の爪を介して行う形状としてある。

これによって電池の出し入れを容易にすると共に，電池がフレーム内で大きく振動することを防いでいる。

タンデムホイールサスペンション

タンデムホイールサスペンションにおいては相前後する2つの車輪の配置が設計上の大きな要因となる。KAZでは前輪において，2つの車輪を前後に幅広く距離を置き，この間にフロントシートを配置する形態をとったが，Eliicaではフロントシートの前方に間隔を置かず配置する構造とした。

本方式のサスペンションではステアリング機構も重要な設計要素となる。Eliica 1号車では前2軸のみを操舵する構造としてある。2号車では4軸目も操舵可能として旋回半径を短くするとともに旋回時のタイヤの滑りを抑えている。

前2軸の操舵にはステアリングコラムの回転力を1軸目と2軸目に対してそれぞれ異なるギヤ比で分割した上で各軸に伝える構造としてある。なお，この分割機構を分配器と名付けることにする。各軸にはそれぞれ電動パワーステアリング機構を取り付けてある。また第4軸目の操舵は分配器に取り付けられたステアリングの回転軸センサからの信号によって行われる。

4. 車体設計

Eliicaでは前節で述べた車体構成技術を基本に置いて，これにサスペンション構造，アッパーフ

レーム，アッパーボディを取り付け，さらにインテリアを構成するという手順で車体設計を行った．

4.1 サスペンション

Eliicaにおけるサスペンションの基本構造はダブルウィッシュボーン方式を採用した．その理由はサスペンションとしての性能を最大限に生かすことが出来ることと，アームの取り付け点も低く出来るため，床面が非常に強度の高いコンポーネントビルトイン式フレームに接続が容易であることによる．

また，フロントサスペンションにおいてはばねとダンパーを前後方向に横置きして，サスペンションアームと，これらの部品はプルロッドで結ぶ構造を採用した．これによってサスペンション部品がコンポーネントビルトイン式フレームの上面より飛び出す高さを最小限度に抑えている．

図4にサスペンションを取り付けた集積台車の実物の写真を示す．同図は車体後方からの写真である．

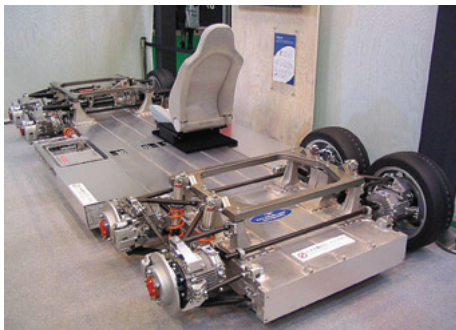


図4 集積台車の外観
Integrated platform

4.2 アッパーフレーム

アッパーフレームは，車体全体の強度と剛性をコンポーネントビルトイン式フレームと協調しながら確保する目的と，ボディを支える目的で構成されている．

Eliicaのアッパーフレームは材質として直径38.1mmの鉄パイプ(SPKM)を基本として構成している．

図5に集積台車に取り付けたアッパーフレームの写真を示す．



図5 アッパーフレーム装着時
Integrated platform with upper frame

4.3 ボディ

Eliicaにおける最も重要な設計要素の1つはボディデザインである．その理由の1つは電気自動車が搭載可能な電力量が限られていることに伴い，消費エネルギーを極限まで減らすことが必要であることである．第2は車体概念としてセダンとスポーツカーのクロスオーバー車とすることに設定したが，このうち，セダンとしての広さを確保する為には空気抵抗は大きくなる方向にあることである．さらに将来，このような車が社会に受け入れられるには8輪車であるという外観上の特徴が機能美として表現されることが必要とされる．

デザイン作業についてはフリーディスカッション，グループディスカッション，ブレインストーミングなどの結果をデザインに反映させる手法で進めた．デザインの過程は通常の車と大差はなく複数のイメージスケッチの作成，そのデータ化，5分の1モデル作成，風洞実験で，原寸大モデルの作成，型取りという順に進めた．

完成した車体の概観を図6に示す．同図に示されているように車室全体の空間は5人が座れる広さを持っている．



図6 完成車の外観
Eliica

また、フロントボンネットに大きなエンジンをおく必要がないことを利用して、この部分が空気抵抗に与える影響を減らす為に全体に丸みを帯びた形状とし、かつ、フロントガラスの傾斜角を大きくとってある。さらに、車室全体が前方に寄っている。一方で、リアの部分は空気抵抗を極力減らすためにオーバーハング部を長く取ってある。

以上述べてきたEliicaの仕様を表4にまとめる。

車全体の大きさは大型セダンに相当する。1号車の出力は短時間の定格として640kW(850馬力)、2号車では480kW(640馬力)である。

表4 Eliica仕様
Specifications of Eliica

型名		1号車	2号車
タイプ		最高速度挑戦用	高加速用
寸法	全長, mm	5 100	
	全幅, mm	1 900	
	全高, mm	1 365	
定員, 名		5	
モータ出力(kW)		640	480
性能	最高速度(目標), km/h	400	190
	最大加速度, G	0.38	0.78
	一充電走行距離, km	180	320
	充電時間(70%回復), min	4	30

5. 動力性能テスト

Eliicaの最高速テストは2004年、1月と2月に国内のプリズトンのテストコースで合計5日間行い、3月にイタリアのナルドにあるプロトタイプ社のブルーピンググラウンド(テストコース)で行った。

図7にイタリアで行った最高速度テストの結果を示す。同図で示されるとおり、最高速度370km/hに達しており、一般のスポーツカー以上のパフォーマンスが発揮された。

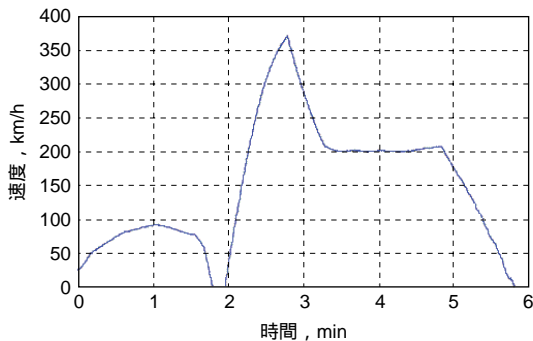


図7 Eliicaの最高速度試験の結果
Result of maximum speed test on Eliica

図8に加速性能試験の結果を示す。この試験は減速ギヤ比6.923のインホイールモータを用いたものである。同図の横軸は走行開始からの時間、縦軸は速度を示してある。同図によると、時速100kmと160kmへの到達時間はそれぞれ4.1秒および7.0秒であった。同図にはポルシェ911ターボを用いて同様の試験を行った結果が示されている。これによると、時速100kmおよび160kmのそれぞれに到着した時間は4.2秒および9.2秒であった。このことから、Eliicaが世界最高水準の加速性能を持つスポーツカーを凌ぐ加速性能であることが明らかである。また、同図をつぶさに眺めると、Eliicaでは初期の加速が高速に至るまで一本調子で伸びていることが分かる。この途切れることのない加速が、これに乗る人々にとって極めて高い快適感を与えてくれる。これは内燃機関自動車が100年にわたって追い求めてきて、いまだに達成できない加速感である。

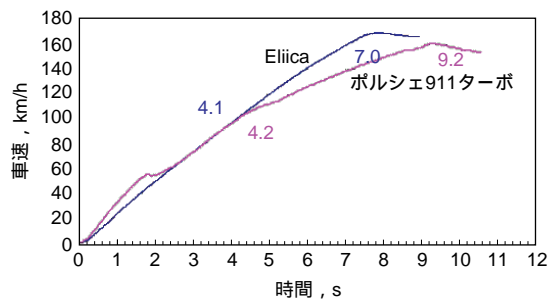


図8 Eliicaの加速度試験の結果
Result of acceleration test on Eliica

6. まとめ

ここでは新概念のリチウムイオン電池自動車Eliicaの開発概要について述べてきた。Eliicaは瞬間最高速度370km/hおよび、0-160km/hの加速時間が7秒と、あらゆるスポーツカーを凌ぐ動力性能を達成するとともに、セダンとしての広さも持つ。さらにテストドライブには片山右京氏が引き受けて下さったが、高速でもセダンとして相応しい十分な乗り心地を備えているとのコメントであった。

このことからEliicaではセダンとスポーツカーというクロスオーバー車としての特徴をいかに発揮できたと言える。