

環境調和型技術としての電気自動車の 評価に関する基礎的研究

Technological Assessment of Electric Vehicle from the Environmental
Protection Viewpoint

清水 浩¹・飯倉善和²・内藤正明²

Hiroshi SHIMIZU, Yoshikazu IKURA and Masaaki NAITO

1. 大気環境部

1. Atmospheric Environment Division

2. 総合解析部

2. Systems Analysis and Planning Division

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

序

自動車に関連する公害は被害が広範囲にわたり、しかも、各種の積極的な対策にもかかわらず、改善の方向に向かっていない。自動車公害対策には、従来から行われてきた排ガス規制や総量規制と並んで、無公害車の実用化も積極的に推進されてきた。無公害車として取り上げられてきた車には、メタノール車や水素自動車などがあるが、抜本的な解決という観点からは、電気自動車に勝るものはないと思われる。

本研究報告書は昭和 58 年度から 60 年度にわたって行われた経常研究『環境調和型技術の基礎的研究』の事例研究の一つとして取り上げた、電気自動車の可能性についての研究結果をまとめたものである。この中では、自動車公害の現状を概括した上で、電気自動車の導入の効果を検討している。また、電気自動車の研究・開発は昭和 40 年頃から始められているにもかかわらず、いまだに大量の普及に至っていないが、本報告書ではこのような現状に至る経緯をつぶさに追跡している。さらに、新しい技術を使った新しい型式の高性能電気自動車の提案を行い、その性能について定量的な評価を試みている。

本研究はこれまでの環境研究の範囲を踏み越えて、極めて技術的な領域にまで踏み込んでいるため、なにかとご批判の対象となる部分も含まれていると思われる。今後の研究に生かすため、御一読下さり、御意見、御批判等が頂ければ、幸甚に思う次第である。

昭和 62 年 2 月

国立公害研究所

所 長 江 上 信 雄

目 次

概 要	1
Abstract	3
はじめに	5
1 研究の背景と検討事項の概要	9
1.1 背 景	9
1.2 検討事項	9
2 自動車公害と電気自動車導入の効果	11
2.1 大気汚染の現状	11
2.2 自動車騒音の現状	16
2.3 自動車公害問題に対する電気自動車導入の効果	18
2.3.1 すべての車が電気自動車に置き替わる場合	18
2.3.2 国道17号線を対象とした窒素酸化物濃度に対する電気自動車導入効果の シミュレーション	19
2.3.3 国道6号線を対象とした電気自動車導入効果のシミュレーション	21
2.4 まとめ	23
3 電気自動車に関する世界の情勢	25
3.1 電気自動車の研究・開発の動向	25
3.2 電気自動車の性能の現状	27
3.3 電池の性能の現状と将来の見通し	31
3.4 普及の現状	33
3.5 電気自動車の普及の見通し	35
3.6 まとめ	38
4 電気自動車の性能向上の可能性	41
4.1 性能向上のための基本的考え方	41
4.2 電気自動車におけるエネルギー消費過程と省エネの可能性	43

4.2.1	電池の内部損失	44
4.2.2	タイヤの転がり摩擦抵抗	45
4.2.3	総重量	46
4.2.4	空気抵抗	51
4.2.5	電動機	52
4.2.6	伝達機構	58
4.2.7	コントローラー	59
4.2.8	ブレーキ損失	61
4.3	電気自動車の性能計算の基本式	61
4.3.1	レンジ（一充電走行距離）	61
4.3.2	最高速度	64
4.3.3	加速性能	64
4.3.4	エネルギー使用率・経済性	65
4.4	省エネ対策を施した電気自動車の性能	67
4.4.1	乗用車	68
4.4.2	大型トラック	75
4.5	まとめ	81
5	電気自動車の普及のために残された問題点とその解決法	83
5.1	冷暖房	83
5.2	発電所での発電容量	83
5.3	充電法	84
5.4	電池材料の資源問題	85
5.5	新たな公害問題	87
5.6	まとめ	87
6	結論	89

CONTENTS

Abstract	1
Preface	5
1 Introduction	9
1.1 The background of the study	9
1.2 The general summary of the study	9
2 The pollution caused by automobiles and the effect of electric vehicles	11
2.1 The state of air pollution	11
2.2 The state of noise by automobiles	16
2.3 The effect of electric vehicles for the pollution by automobiles	18
2.3.1 The case where all of the automobiles are replaced by electric vehicles ...	18
2.3.2 The simulation of the effect of electric vehicles in the density of NO _x on the roadside of route 17	19
2.3.3 The simulation of the effect of electric vehicles on the roadside of route 6	21
2.4 Summary	23
3 The state of electric vehicles in the world	25
3.1 The state of research and development	25
3.2 The state of the performance of electric vehicles of today	27
3.3 The state of batteries of today and outlooks	31
3.4 The state of spread	33
3.5 The outlooks of wide spread of electric vehicles	35
3.6 Summary	38
4 The possibility of the improvement of the performance of an electric vehicle	41
4.1 The basic concept of the improvement of the performance of an electric vehicle	41

4.2	Energy consuming processes in electric vehicles and the possibility of energy save	43
4.2.1	Internal loss of energy in a battery	44
4.2.2	Rolling drag	45
4.2.3	Total weight	46
4.2.4	Air drag	51
4.2.5	Traction motor	52
4.2.6	Transmit-system	58
4.2.7	Speed controller	59
4.2.8	Braking loss	61
4.3	The equations to calculate the performance of an electric vehicle	61
4.3.1	Range per charge	61
4.3.2	Maximum velocity	64
4.3.3	Acceleration	64
4.3.4	Energy consumption rate	65
4.4	The performance of an energy saved electric vehicle	67
4.4.1	Passenger car	68
4.4.2	Large size truck	75
4.5	Summary	81
5	Problems in wide spread use of electric vehicles and solution of them	83
5.1	Air conditioning	83
5.2	Capacity of generation in power plants	83
5.3	Charging	84
5.4	Resources of materials for batteries	85
5.5	New pollution	87
5.6	Summary	87
6	Conclusion	89

概 要

自動車公害問題の解決のための電気自動車導入の効果

すべての車が電気自動車に替われば窒素酸化物の環境濃度は全国どこでも環境基準を満たすことが可能。大型のディーゼル車は一部を電気自動車に替えても、環境改善が著しく進行。

電気自動車の研究・開発の動向

公害やエネルギー問題が顕在化した一時期、世界的に電気自動車の研究・開発が積極的に行われたが、現在は停滞の状態。

電気自動車の性能の現状

一充電走行距離、加速度、最高速度のいわゆる動力性能がエンジン自動車に比べ著しく低劣。維持費は同程度。

電池の性能の現状と将来の見通し

数多くの種類の電池が研究されているが、総合的な性能で鉛電池に勝るものはない。この傾向は急速に改善される見込みがなし。

普及の現状

日本では500台程度、アメリカではその10倍程度で、エンジン自動車の数と比較して、極めて少数の普及。

普及の見通し

普及が大幅に進むという強気の見通しもあるが、現実を考えると、現状の性能の電気自動車では大量の普及は困難。

電気自動車の性能向上の可能性

この10年程の間に発展した自動車技術、材料技術、電子技術などの最新の技術を結集すれば、大幅な性能向上の可能性あり。ここでは、このような技術を集結した新しい電気自動車のことを省エネ型電気自動車と呼ぶ。

省エネ型電気乗用車の性能の計算結果

現状の性能の鉛電池400kg積載する場合、4人乗りの乗用車の動力性能として、一充電走行距離320km(4モード走行)、最高速度180km/h、0~400m加速時間20秒を得ることが可能。電力料金と電池の償却費を含む維持費は4モード走行の場合、2円/km程度と非常に低廉。

省エネ型電気トラックの性能の計算結果

積載量11トンのトラックを想定すると、一充電走行距離330km(4モード走行)、最高時速200km/h。維持費はディーゼルトラックの約1/2。

省エネ型電気自動車の総合評価

現在のエンジン自動車と比較して、動力性能はほぼ同等。価格も同程度の見込み。無公害。維持費は圧倒的に低廉。乗り心地、安全性、運転の容易さ、保守の容易さ、故障の少なさなどでも有利。

大量に電気自動車が普及する場合の問題点

冷暖房、発電所での発電容量、充電方法、電池用材料の資源、新たな公害の発生などの問題が考えられるが、いずれも解決可能。

Abstract

The effect of electric vehicles for the solution of pollution problems caused by automobiles

The present state of research and development of electric vehicles
The performance of electric vehicles of today

The Performance and future prospect of batteries

The state of practical uses

The possibility of large number of practical uses

The possibility of the improvement of the performance of an electric vehicles

The calculated performance of an energy saved electric passenger car

The replacement of all internal combustion engine (ICE) cars by electric vehicles will enable the standard of NO_x density to be abided by throughout the country. The partial replacement of large size Diesel engine trucks by electric vehicles will bring about great improvement of environmental situation.

Research and development of electric vehicles used to be very active all over the world, but now it is decreasing.

The performance of driving such as range per charge, acceleration and maximum velocity is much less than that of ICE cars. Running cost of an electric vehicle is almost the same as that of ICE cars.

Among many types of batteries under researching, lead acid battery is best in view of overall performance. This tendency is considered to continue also from now on.

500 electric vehicles are used in Japan now. In the United States, electric vehicles in 10 times larger numbers than Japan are now under practical uses.

There is a strong opinion that practical uses of electric vehicles will be greatly achieved in the future. However, large number of practical uses will be difficult by considering the number of present practical uses.

Electric vehicles will have much better performance compared with traditional electric vehicles, by assembling new techniques in the field of automobiles, materials and electronics which have been developed in these 10 years. Here, the new electric vehicles in which new techniques are combined will be called "energy saved electric vehicles".

In 4 persons passenger electric vehicles, 320 km of range (4 mode driving schedule : correspond to city drive), 180 km/h of maximum velocity and 20 s of 0 to 400 m acceleration time will be achieved by using 400 kg of a

commercialized lead acid battery. The running cost including the price of electricity and the battery is 2 yen/km in 4 mode driving schedule.

The calculated performance of an energy saved electric truck

In a large sized electric truck with 20 tons weight in total, 11 tons payload, the range per charge is 330 km (4 mode driving schedule), maximum velocity is 200 km/h. The running cost is almost half of a Diesel truck.

Total evaluation of an energy saved electric vehicle

The performance of driving and price of the energy saved electric vehicle will be almost the same as that of IEC car. No pollution. Running cost is overwhelmingly low. More comfortable, safer and easier driving, and easier maintenance in the energy saved electric vehicle.

Possible problems in wide spread use

The problems are, air conditioning, capacity of generation in power plants, charging, resources of the materials of batteries and the new pollution. All these problems will be solved.

はじめに

人間の生存や生活のために役立つはずの技術が、一方でしばしば環境汚染の主因となっていることは周知の通りである。そこで、この負の側面から技術を改めて見直すべきであることは、既に多々指摘されている通りである。環境問題を研究対象とする我々にとって、この種の仕事を等閑にすることはできないが、これまでは公害発生のメカニズム及び発生した環境への対処に関する研究に追われ、その根元たる発生原因そのものに対する検討は当研究所ではあまり行われてこなかった。もちろん技術的な問題全般について研究を広げることは当研究所の立場上からも不可能であるが、特に環境とのかかわりが深い対象をいくつか取り上げて、環境保全の立場から技術のあり方を再検討すること（広い意味でのテクノロジーアセスメント）は今後我々にとっても大事な課題となろう。

ところで環境に悪影響を及ぼす多くの技術の中には、人間の生存にとって必須でないと指摘されているものもある。しかし、ほとんどの技術は人間の生存や生活にとって何らかの効用をもたらすが、それと同時に、程度の差はあれ、環境に影響を与える。そこでこの“効用”と“環境被害”を総合的に考慮し、本来の効用をできるだけ低下させることなく、環境被害を最小化する方策を検討することが本研究課題で言う“環境調和型技術の開発”である。ここでは対象とする技術として、今日最も環境とのかかわりが大きい“自動車”を取り上げた。言うまでもなく自動車を主因とするいわゆる交通公害問題は、現在我が国の最大の公害事象の一つである。したがって、もし、適切な技術改良により、このような環境悪化原因（排ガス、騒音、振動等）の発生を抑えることができれば、その環境改善効果は多大なものがある。

自動車の公害対策としては既にエンジンの排ガス規制が相当の効果を上げた。しかし、その技術をディーゼル車へ適応することの難しさや、車の台数が予想を越えて増加したことなどが原因となって、昭和60年度に予定された窒素酸化物の、環境基準の達成が相当地域で困難となった。このことから、自動車排ガス処理技術の向上や各種の規制のみではこの問題の解決は困難であろうとの見通しが一般的である。したがって、それに替わる技術として、排気ガスを出さないことと、さらに騒音が少ないという特徴を持つ代替交通手段、特にその中でも最も有望と思われる電気自動車の普及を検討することにした。

ところが、現状の電気自動車は、一充電走行距離、加速度、最高速度のいわゆる動力性能がこれまでのエンジン自動車に比べて実用的なレベルに達していないこと、価格が高いことなどのために、大量の普及には至っていない。電気自動車を大量に普及させ、公害問題の解決に役立てるには単に低公害性という点ではなく、安全性及び利便面でも現在のエンジン自動車に匹敵するも

のであることが必要である。これが達成されれば、電気自動車は代表的な環境調和型技術の例となり得よう。

本報告書は、以上のような観点から電気自動車の性能向上の可能性を技術的に検討した結果を基に、公害問題に対する電気問題に対する電気自動車の果たし得る役割、世界的にみた電気自動車の現状、さらに、電気自動車の普及に当たっての問題点に言及する。

なお、このような新たな技術が大規模に社会に定着するには、単に技術的フィージビリティのみでなく、社会の制度的枠組みのあり方が支配的である。特に、自動車という現代社会を支配する最大の技術体系を改変するようなものについては、社会的受容性の有無が決定的である。しかし本報はまず技術的側面に検討範囲を絞り、その性能上限を見極めることとした。そしてこの結果を踏まえた上で、次にこれが社会に受け入れられるための諸課題について引き続き検討を進める予定である。

成果発表一覧

印刷発表

昭和 58 年度

発表者	題 目	掲載誌	巻	ページ	発表年
清水 浩	電気自動車の現状と将来の展望 その 1 電気自動車に関する世界の情勢	自動車研究	5	423-428	1983
清水 浩	電気自動車の現状と将来の展望 その 2 一充電走行距離向上の検討	自動車研究	5	663-668	1983
清水 浩	電気自動車の現状と将来の展望 その 3 電気自動車の動力性能と経済性	自動車研究	6	7-13	1984
清水 浩	電気自動車の現状と将来の展望 その 4 電気自動車の利点と残された問題点	自動車研究	6	46-51	1984
清水 浩・飯倉善和・ 乙間末広・田村正行・ 内藤正明	電気自動車の役割と実用化の可能性	公害と対策	20	207-214	1984

昭和 59 年度

Hiroshi Shimizu, Yoshikazu Iikura	Improvement in the range of an electric car by reducing energy loss	Progress in Batteries & SOLAR Cells (JEC Press)	5	229-231	1984
清水 浩・飯倉善和・ 溝口次夫	電気自動車の新しい技術の提案(1) —都市型公害の軽減と省エネルギーのために	環境技術	13	475-489	1984
清水 浩・飯倉善和・ 溝口次夫	電気自動車の新しい技術の提案(2) —電気乗用車と電気トラックの性能評価	環境技術	13	741-754	1984

昭和 60 年度

清水 浩・飯倉善和・ 内藤正明	省エネルギー型電気自動車の提案とその性能評価	エネルギー資源	7	93-100	1986
--------------------	------------------------	---------	---	--------	------

口 頭 発 表

昭和 58 年度

発 表 者	題 目	学会等名称	発表番号等	開催都市	年・月
清水 浩・飯倉善和・ 内藤正明	電気自動車の一充電走行距離 向上の検討	自動車技術会学術 講演会	832074	名古屋	58.10

昭和 59 年度

Hiroshi Shimizu, Yoshikazu Iikura, Masaaki Naito	The improvement of the performance of an electric car by the energy saving design	19th IECEC'84	849055	San- Francisco	59.8
清水 浩・飯倉善和・ 内藤正明	省エネルギー型電気自動車の 一次エネルギー使用量の検討	第2回エネルギー システム・経済コ ンファレンス	1-2	東京	60.1

昭和 60 年度

清水 浩・飯倉善和・ 内藤正明	省エネルギー対策を施した電 気自動車の性能向上の可能性	自動車技術会学術 講演会	801058	東京	60.5
清水 浩・飯倉善和・ 内藤正明・小野昌朗・ 小此木路・富田忠治	トライアルレース用電動二輪 車の開発	第3回エネルギー システム・経済コ ンファレンス	6-3	東京	61.1

1 研究の背景と検討事項の概要

1.1 背景

現在、公害問題として環境庁が抱えている対象の内、自動車公害問題は最も重要なものの一つである。しかも、幾多の対策にもかかわらず、問題の深刻さは年を経るごとにその度を深めている。自動車公害問題に、もし、抜本的な解決策が見いだせるとしたら、電気自動車はその有力な候補になり得ることは容易に想像がつく。ところが、技術的観点から見て、それは不可能であろうというのが、現在の一般的な見方である。また、たとえ電気自動車が普及したとしても、新たな公害問題や社会問題が発生するのではないかという疑問も常識的な問いかけとして聞かれる。

ところで、過去において、電気自動車の研究・開発が盛んだった1時期がある。日本を例にとると、昭和40年代に公害問題が社会問題として大きく取り上げられ始められた時期に端を発し、昭和46年から6年間に、通産省が大型工業技術開発制度いわゆる大プロの形で電気自動車を取り上げた時代に頂点に達した。ところが、その成果を持ってしては、電気自動車の大量な普及に至らしめることができなかった。その後、電気自動車の研究・開発は沈静化に向かい、約10年が経過した。

この間、自動車問題が、より深刻化したのは上記のとおりである。それと同時に、このところのいわゆるハイテクブームに乗って、これまでになかった新しい技術が続々と開発されつつあることが見逃せない。これらの技術は、すべて電気自動車の研究・開発とは異なる分野で生まれてきたものであるが、電気自動車への応用に結びつけられれば、その性能向上に大いに貢献できるものがいくつか見受けられる。これらの技術の集積によって、これまでに考えられなかったような高性能な電気自動車の出現の可能性もある。これら2点の現状の認識が、電気自動車を取り上げて研究対象とすることの主な背景である。

1.2 検討事項

一般的な観点からの電気自動車への興味の対象は電気自動車の現状であろう。また、新しい技術を取り入れた場合の電気自動車の性能向上の可能性は、それ以上の興味であろう。したがって、本報告書では、それぞれ第3章と第4章を用いてこれらを重点的に取り上げている。

また、対自動車公害という観点から見ると、表1.1にまとめたような検討事項がある。すなわち、現行のエンジン自動車と電気自動車のそれぞれについて、資源採取過程、製造過程、利用過程、廃棄物処理過程での環境影響の検討が必要になる。これらの各過程での環境影響はそれぞれ

重要な側面を持っており、各過程ごとに検討を要する。これらのうちで、現在、最も深刻な問題は利用過程で発生している。したがって、本報告書では、第2章のすべてをこの部分の検討に費した。電気自動車では広い意味の利用過程での環境影響として、発電量の増加に伴う問題が懸念されるが、これについては第5章で述べてある。さらに、廃棄物処理過程では、電気自動車における使用済み電池の処理が問題となり得るが、この問題も第5章で取り上げている。その他、環境影響として問題になり得ることはいくつか考えられるが、現状ではその大きさを把握することが困難であるために、表1.1に事項を掲げるにとどめ、特別には言及しないこととした。

表1.1 エンジン自動車及び電気自動車のライフサイクルにおける環境影響の検討事項

過 程	エンジン自動車	電 気 自 動 車
資源採取		鉛 希土類材料
製 造	メッキ 塗 装	鉛電池 半導体 新素材
利 用	排ガス 騒 音 振 動	振 動
廃棄処理	鉛電池 プラスチック類 タイヤ	鉛電池 新素材 タイヤ

自動車に関する議論では、この他、資源問題と費用の問題を取り上げる必要がある。資源問題についてはエネルギー資源と材料に分けられる。さらに、エネルギーに関しては製造や廃棄の過程と、利用過程に分離できる。これらのうち、利用過程におけるエネルギー問題については第4章で述べてある。また、材料として問題となり得る電池材料に関しては第5章で触れてある。しかし、利用過程以外のエネルギーに関しては検討の対象外とした。費用に関しても、利用過程と、その他の過程について、それぞれの議論がある。このうち、前者については第4章に記載されている。だが、後者については、現在のところ定量的な議論が困難であるため省いてある。定性的に言えることは、大量生産が成されるという前提の下では、たとえ電気自動車に新しい材料を使用したとしても、構造がエンジン自動車に比べて比較にならないほど簡単であることから、電気自動車がエンジン自動車より大幅に高価になるとは考えられない。

2 自動車公害と電気自動車導入の効果

電気自動車はエンジンを積んでいないので、走行中に排ガスを出さず騒音も少ない。したがって、電気自動車を導入すれば、自動車によりもたらされる大気汚染と騒音レベルが低下するのは容易に想像がつく。ここではまず、自動車公害の概況について述べる。さらに、これまでのエンジン自動車が電気自動車に置き替わった場合の効果について検討する。

現在、自動車公害として問題となっているのは大気汚染と、騒音・振動である。したがって、ここではこれら両者を扱うものとする。また、導入の効果の検討においては、日本全体が電気自動車に置き替わった場合の効果と、対象地域を限った上で、置換率を定め、その効果を計算する。効果の目安としては、環境基準や規制値を取り上げ、これらがどの程度満たされるようになるかを判断の基準とする。

2.1 大気汚染の現状

大気汚染物質として、現在、問題となり規制の対象となっている主なものは、硫黄酸化物、窒素酸化物、炭化水素、光化学オキシダント、一酸化炭素、浮遊粒子状物質である。以下、これらの物質ごとに、自動車公害との関連を見たい。

1) 硫黄酸化物

硫黄酸化物は硫黄を燃焼させることにより発生する。硫黄は、原油や石炭にかなり含まれており、硫黄酸化物による汚染の大部分はこれらの燃焼により引き起こされるが、精製によりガソリンに硫黄分が残留することはほとんどない。しかし、ディーゼルエンジン自動車用の軽油には多少残留する。硫黄酸化物は国そして地方公共団体、企業の努力の結果、その排出量は大幅に削減され図2.1に示すように、昭和42年をピークにして年々減少している¹⁾。硫黄酸化物の環境基準は1時間値の1日平均値が0.04 ppm以下であり、かつ1時間値が0.1 ppm以下であること、となっているが、昭和59年度の環境基準の達成率は99.4%となっている³⁾。このような状況から、大気汚染物質としての、硫黄酸化物の問題は低下の傾向にある。ところが極く最近になって、自動車排ガス測定局での調査によると、その排出がディーゼルトラックの増加に伴って増えているという報告があり⁴⁾、楽観を許さない状況になりつつある。

2) 窒素酸化物

窒素酸化物は、主な成分が一酸化窒素(NO)及び二酸化窒素(NO₂)である。高温で物を燃やせば必ずNOが発生し、それが光化学反応によりNO₂に一部変質する。窒素酸化物の排出源は、自動車、工場、発電所及び一般家庭など数多くがある。これらの排出源別の排出量のうち車

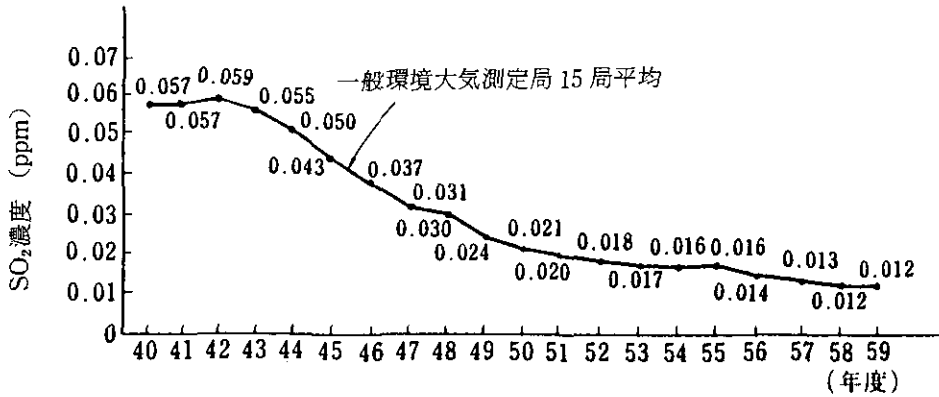


図 2.1 硫黄酸化物の環境濃度の経年変化^{1,2)}

の占める割合は地域により異なるけれども、おおむね 50%程度である⁵⁻⁸⁾。

総排出量に占める自動車の割合はこのような比率であるが、高い煙突から排出される発電所や工場に比べ、自動車による排出は、地上の濃度に大きな影響を与える。

NO₂の一般環境大気測定局 15 局と、自動車排ガス測定局 26 局の年次ごとの平均値を図 2.2 に示す^{1,2)}。窒素酸化物は排出ガスから取り除く技術が特に難しいため、削減の努力にもかかわらず環境濃度は年々横ばいの傾向にあるのは図 2.2 に示す通りである。

このような、横ばいの傾向と同時に注目すべきは、環境基準の達成率である。環境基準は 1 時間値の 1 日平均が 0.04 ppm から 0.06 ppm までのゾーン内またはそれ以下であることと定められている。しかも、昭和 53 年にこのように基準が緩められたが、その時に、基準の達成の目標年次が 7 年後の昭和 60 年とされた。ところが昭和 58 年までの NO₂にかかわる環境基準と測定

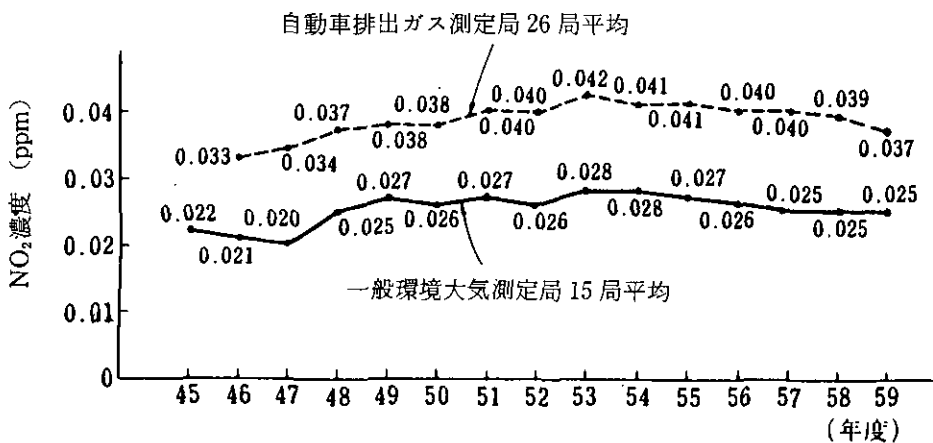
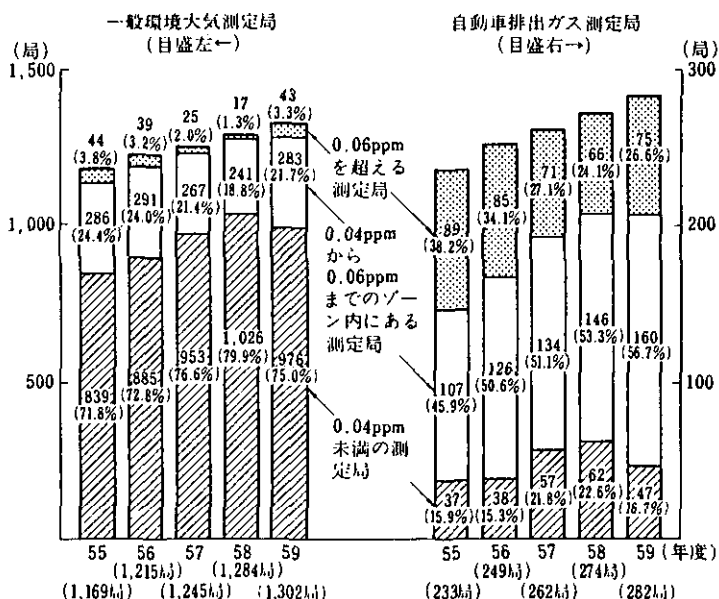


図 2.2 NO₂の一般環境大気測定局と自動車排ガス測定局における年次ごとの平均値^{1,2)}

値の対応状況が図 2.3 に示すような値となっている¹⁾。同図より昭和 59 年度において、一般環境大気測定局では 0.06 ppm を越える測定局は 3.3% であるが、自動車排出ガス測定局では 26.6% もの高い値を示している。さらに 0.04 ppm を越える測定局となると、83.3% にも及んでいる。また、昭和 60 年 4 月の測定結果では幹線道路沿いの測定局で基準を超えたところが続出していると言われており、目標の 60 年度の基準達成は不可能であった。このため、環境庁は、「環境基準を昭和 63 年度、遅くとも 65 年度までに達成」するための中期展望をまとめることにしている。その施策として、交通総量の抑制がその中心として位置づけられているほか、ディーゼル車の排ガス規制強化、電気自動車やメタノール車の普及を促進することなどがあげられている。



- (備考) 1. 環境庁調べ。
 2. 自動車排出ガス測定局は、資料採取口が車道内にあるものを除外した。
 3. 図中の () 内は、全測定局数に占める当該測定局数の比率である。
 4. 濃度は、1 日平均値の年間 98% 値である。

図 2.3 NO₂ の測定値と環境基準の対応状況¹⁾

窒素酸化物に限らず、自動車による大気汚染物質の排出量において注目すべきは、車種別の割合である。東京都内において窒素酸化物について調査がなされた例がある⁸⁾。昭和 60 年において乗用車類とトラック類の走行キロ数の比は 53.4% 対 46.6% で乗用車類の割合が高いが、窒素酸化物排出量に関しては 26.4% 対 73.6% でトラック類が圧倒的に高い。

3) 非メタン炭化水素

炭化水素は炭素と水素とから成る有機化合物の総称で、多くの化合物が含まれる。

炭化水素は評価の難しさから、環境基準もまだ定められていない。炭化水素の環境中の濃度の基準の目安としては昭和51年8月に、中央公害対策審議会より答申された「光化学オキシダント生成防止のための大気中炭化水素濃度の指針について」に記載されているものが存在する。この中では、炭化水素の測定については非メタン炭化水素を測定することとされ、光化学オキシダント生成防止のための濃度レベルの指針は6~9時の3時間平均値が0.2 ppm~0.31 ppmの範囲にあることとされている。非メタン炭化水素は、有機溶剤を使用する工場、石油類のタンク、塗装及び自動車により排出されるが、自動車による排出の割合は約半分である。

昭和58年度の一般環境大気測定局における非メタン炭化水素の6~9時の3時間平均の年平均値の濃度分布は表2.1に示す通りである³⁾。同表によると、0.2 ppmを下回る場所は13.7%、0.30 ppm以下のところも41.2%である。また、自動車排出ガス測定局の年次ごとの平均値を表2.2に示す^{1,2)}。同表によると非メタン炭化水素は年々わずかながら減少の傾向にあるが、それでも、指針をはるかに上回っている。

表2.1 一般環境大気測定局における非メタン炭化水素6~9時3時間平均値の年平均値の濃度分布³⁾

項目	濃度区分 (ppmC)	0.10	0.11	0.21	0.31	0.41	0.51	0.61	0.71	0.81	合計
		以下	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	
測定局数		4	38	84	76	64	22	12	3	3	306
割合 (%)		1.3	12.4	27.5	24.8	20.9	7.2	3.9	1.0		
累積 (%)		1.3	13.7	41.2	66.0	86.9	94.1	98.0	99.0	100.0	

表2.2 自動車排出ガス測定局継続13測定局における非メタン炭化水素年平均値の単純平均値の年度別推移^{1,2)}

項目	年度	53	54	55	56	57	58	59
	13局平均		0.70	0.63	0.58	0.54	0.57	0.55

単位：ppmC.

4) 光化学オキシダント

昭和45年夏以来、毎夏、光化学大気汚染の影響とみられる目の刺激、のどの痛み、胸苦しきなどの健康被害が出ている。光化学大気汚染の原因は、大気中の窒素酸化物と炭化水素が太陽か

らの紫外線を受けて光化学反応を起こし、人体に有害な物質を作り出すものとされている。その物質はオゾンなどのオキシダントがほとんどであるが、窒素酸化物と炭化水素の生成を抑えれば、光化学大気汚染は発生しない⁹⁾。

5) 一酸化炭素

一酸化炭素の主な排出源は自動車である。一酸化炭素の年平均値の経年変化を図2.4に示す^{1,2)}。同図によると、一酸化炭素濃度は年々減少する傾向にある。このため、昭和55年度には環境基準未達成の測定局が0.9%であったが、56年以降はすべての測定局で基準が達成されている。なお、一酸化炭素の環境基準は1時間値の1日平均値が10 ppm以下であり、かつ、1時間値の8時間平均値が20 ppm以下であることである。

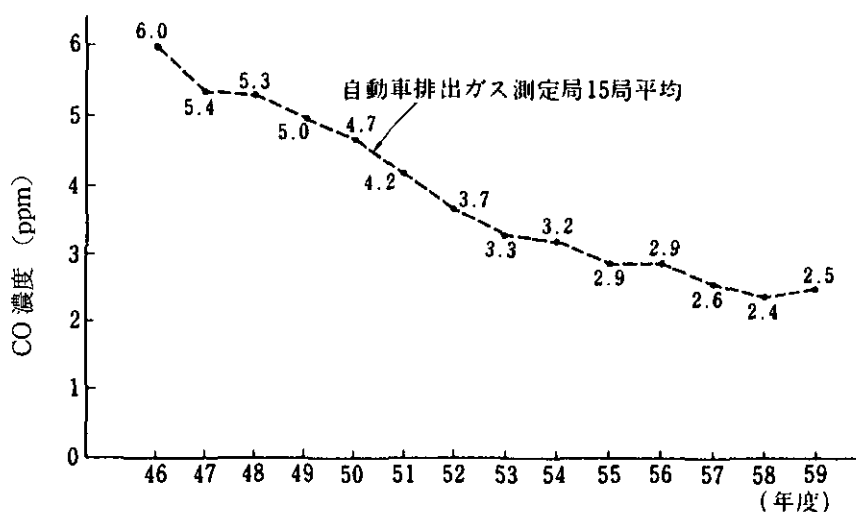


図2.4 COの年平均値の単純平均値の経年変化^{1,2)}

6) 浮遊粒子状物質

浮遊粉じんのうち粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子は沈降速度が小さく、大気中に比較的長期間滞留する。また、このように小さな粒子は人体に吸い込まれた時、気道や肺胞に吸着されて呼吸器に影響を及ぼすことが指摘されている。したがって、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子を対象として、浮遊粒子状物質についての環境基準が設定されている。

表2.3に環境基準の達成状況を示す^{1,2)}。同表は一般環境大気測定局で測定された結果である。同表より、基準の達成率はこの4年間向上の傾向にあったが、59年度は58年度に比べて悪化している。

表 2.3 浮遊粒子状物質の一般環境大気測定局における環境基準達成状況^{1,2)}

項目	年度	54	55	56	57	58	59
	測定局数		226	271	286	353	465
達成局数		46	79	109	173	293	304
達成率(%)		20.4	38.1	49.0	63.0	50.1	

(備考) 有効測定時間に達していない測定局は除く。

浮遊粒子状物質中に自動車排ガスの占める割合は相当である⁹⁾。それは、測定値の濃度上位測定局の中に、千葉、埼玉、神奈川、及び愛知の各都市部の測定局が含まれていることから裏づけられる。

以上あげた大気汚染関係で問題になる物質のうち、主なものについて、自動車による寄与率をまとめたものを表 2.4 に示す⁵⁻⁷⁾。同表において、窒素酸化物については出典の違いによりばらつきがあるが、東京を例にとると、車の寄与率が78%にもなるという報告がある⁶⁾。

表 2.4 主な大気汚染物質の車による寄与率⁵⁻⁷⁾

汚染物質	地域	自動車による寄与率
NO _x	全国 ⁷⁾	40(%)
	全国 ⁵⁾	55
	東京 ⁶⁾	78
CO	全国 ⁵⁾	93
炭化水素	全国 ⁵⁾	57

2.2 自動車騒音の現状

自動車公害のもう一つの大きな問題である騒音について考える。自動車の騒音は被害の程度を耳で直接聞くことができるため苦情も多く、件数だけで比較すると大気汚染の2倍以上にもなる。騒音問題のうち、自動車騒音についてみる。都道府県等が、騒音を代表すると思われる地点、又は騒音による問題を生じやすい地点で昭和59年度に測定した自動車騒音の結果を図2.5

に示す³⁾。同図によると、騒音による環境基準を24時間にわたって達成している測定点は全測定点のわずか15.1%しかなく、また、要請限度を超える地点は25.5%にもなっている。なお、同図において、4時間帯と示してあるのは、1日を朝、昼、夕、夜間と分けた四つの時間帯のことである。環境基準の達成状況及び要請限度の超過状況を区域の区分別に見たのが図2.6である³⁾。同図において、住居区域であるため、最も静穏であることが必要とされているのが第2種区域であるが、この区域において最も環境基準の達成率が低い。同図より、この区域での環境基準を達成している測定点は4.2%のみであり、要請限度を超過している測定点は37.6%にもなっている。

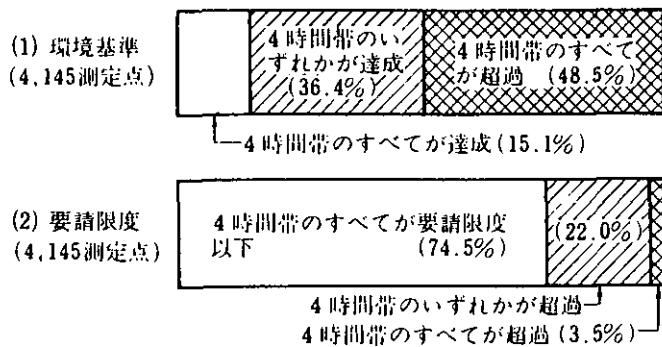


図 2.5 騒音の環境基準の達成状況及び要請限度の超過状況³⁾

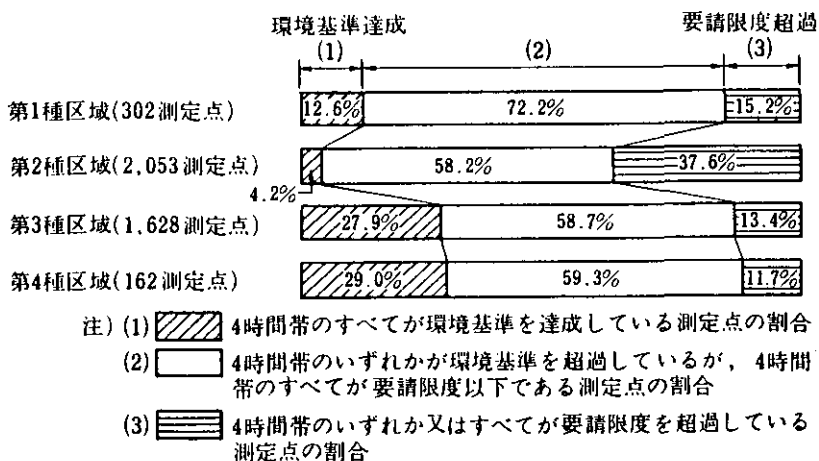


図 2.6 区域の区分別騒音環境基準の達成状況及び要請限度の超過状況³⁾

また、時間の区分別にみたのが図2.7である³⁾。最も静穏の要請されているのは夜間であるが、この図から、基準の達成率は43.1%、要請限度を越えるところも18.2%と高い値を示している。このことは、夜間に耐えられない程騒音の高いところがかかなりあることを示しており、問題の深刻さを浮きぼりにしている。

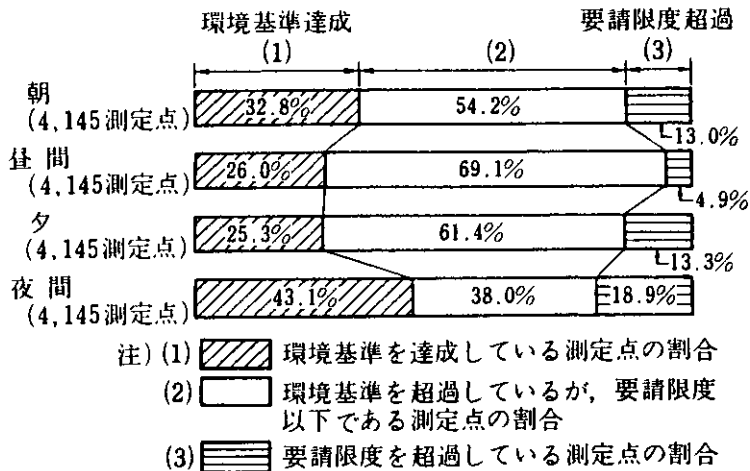


図2.7 時間の区分別騒音環境基準の達成状況及び要請限度の超過状況³⁾

2.3 自動車公害問題に対する電気自動車導入の効果

ここでは、すべての車が電気自動車に置き替わった場合と、一部が置き替わる場合に分けて、自動車公害問題改善のための電気自動車導入の効果を検討する。

2.3.1 すべての車が電気自動車に置き替わる場合

もし、現在の車が、すべて電気自動車に替わったと仮定した場合、例えば窒素酸化物の濃度はどの程度まで下がるであろうか。表2.5に昭和60年度のNO₂の1日平均値の平均98%値が高い一般環境大気測定局と、そこでの年間98%値を示す¹⁾。表2.5より、全窒素酸化物排出量のうち、東京都市部の自動車の寄与率を78%とすると、最も濃度の高い荒川の測定局でも17ppb程度まで下がり、環境基準を十分に満たすことになる。

騒音については、電気自動車は同クラスのエンジン自動車に比べて、約10分の1のレベルである¹⁰⁾。図2.7より、もし、騒音レベルが現在の10分の1に低下したとすれば、全国で1日を平均して78%、夜間には86%の地域が環境基準を満たすことになる。

次に、実際の道路をモデルとして、電気自動車がエンジン自動車に置き替わることによる効果をシミュレートしてみる。

表 2.5 NO₂1 日平均値の年間 98%値,上位測定局

都道府県	市町村	測定局	日平均値の 年間98%値(ppm)
東京	荒川	荒川	0.078
		千代田 都庁前	0.077
神奈川	横浜	港北区総合庁舎	0.077
東京	足立	足立	0.075
神奈川	横浜	中区本牧	0.074
東京	中野	中野	0.073
神奈川	横浜	鶴見保健所	0.073
		鶴見区生麦小学校	0.073
		港南区野毛中学校	0.072
		川崎 幸保健所	0.072
		多摩保健所	0.072

2.3.2 国道17号線を対象とした窒素酸化物濃度に対する電気自動車導入効果のシミュレーション

車のうちの何割が電気自動車に置き替われれば大気汚染の濃度に顕著な効果が現れるかについて、窒素酸化物を対象としてシミュレートしてみたい^{11,12)}。まず、車種を乗用車を主体とする小型ガソリン車及び、4t積トラックを主体とする大型ディーゼル車で代表させると、それぞれの車種についての1km当たりの窒素酸化物排出量は、4モード走行においてそれぞれ0.36g及び4.9gである¹⁾。道路は、埼玉県戸田市内の国道17号線、いわゆる新大宮バイパスを選ぶ。この道路は、首都圏と東北、上越地方を結ぶ文字通りの動脈で、道路の幅員が50mで片側3車線の広さを持っている。交通量は1980年8月5日の調査では毎分66台で、うち、大型ディーゼル車の占める割合は50%であった。この道路について、道路端から風下側にそれぞれ0, 10, 20, 50, 100mの5点を選び、NO_x, COの10分間平均値を測定した例を図2.8に示す。これらの測定結果より、平坦な地域における自動車排ガス成分の風下方向への拡散は次式で表現できる。

$$C(x) = C_B + Q_L(2/\pi)^{1/2}(V_a\sigma_z)^{-1} \quad (2.1)$$

ここで $C(x)$ は風下方向 x での濃度、 C_B はバックグラウンド濃度、 Q_L は汚染物質の排出強度、 V_a は道路と直角方向風下の風速、 σ_z は鉛直方向の濃度分布の標準偏差である。

(2.1) 式を用いることにより、電気自動車への置換による汚染ガス成分の濃度の水平方向への分布を窒素酸化物について計算すると、図2.9のような結果になる。同図では、現状に対して、

小型車と大型車ディーゼル車を半分及びすべて電気自動車に置換したそれぞれの場合について計算を行った結果を示している。同図より、特にディーゼル車が置き替わることによる濃度低下の割合が著しいのは通常感覚とよく一致している。

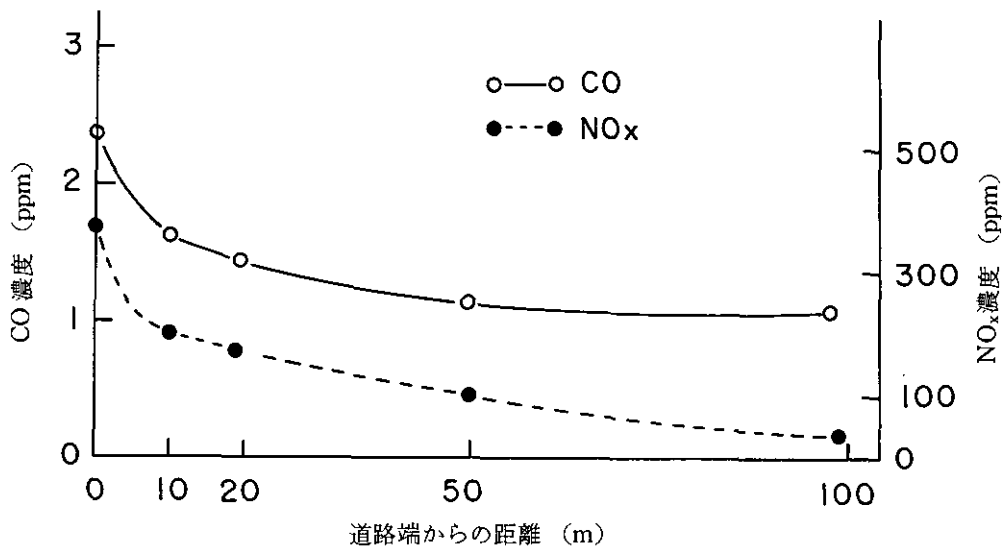


図 2.8 道路から直角風下方向の CO 及び NO_x濃度の測定値

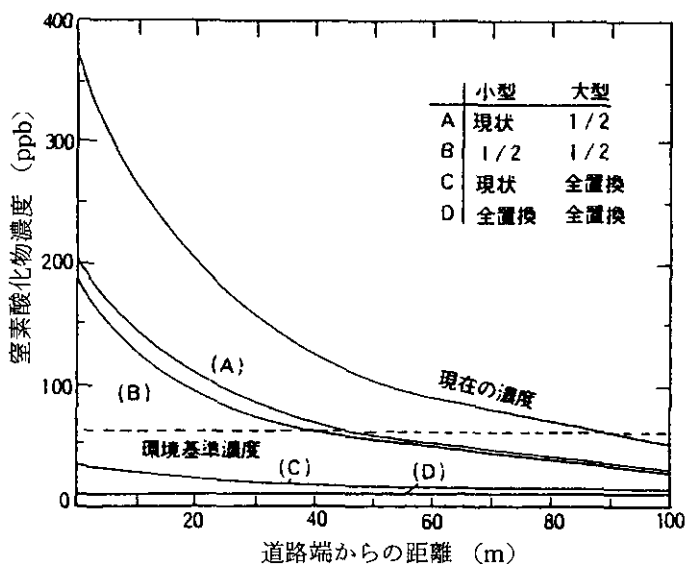


図 2.9 国道 17 号線をモデルにした電気自動車導入による NO_x濃度低下の効果

2.3.3 国道6号線を対象とした電気自動車導入効果のシミュレーション

沿道の大気汚染や騒音を評価する指標としては汚染物質そのものの濃度や環境基準の達成率などいくつか考えられる。ここでは、道路が人間活動と密接なつながりをもっていることから、沿道の人口の張り付き具合を考慮した窒素酸化物汚染暴露人口を使って電気自動車導入の効果を試算した¹³⁾。対象とした道路は国道6号線で土浦市街地を縦断する部分の、約10 kmとした。この地域の沿道（道路から100 m以内）総人口は約12,000人である。

試算結果は、窒素酸化物濃度とその濃度以上の地域に住む人口、すなわち累積暴露人口との関係として図2.10に示す。想定された電気自動車への置換率も同図中に表としてまとめてある。

図からも分かるように、現状（Case A）では環境基準である40 ppbを越える地域に約600人住んでいる。さらにそのうち約450人は60 ppb以上に暴露されている。

交通量その他の条件をそのままにしておき、小型車を電気自動車に置換したときの累積暴露人口は図中Case Bのようになる。図が示すように、40 ppb以上暴露される人は約250人となり現状の1/2以下である。また、50 ppb以上の暴露人口は0である。

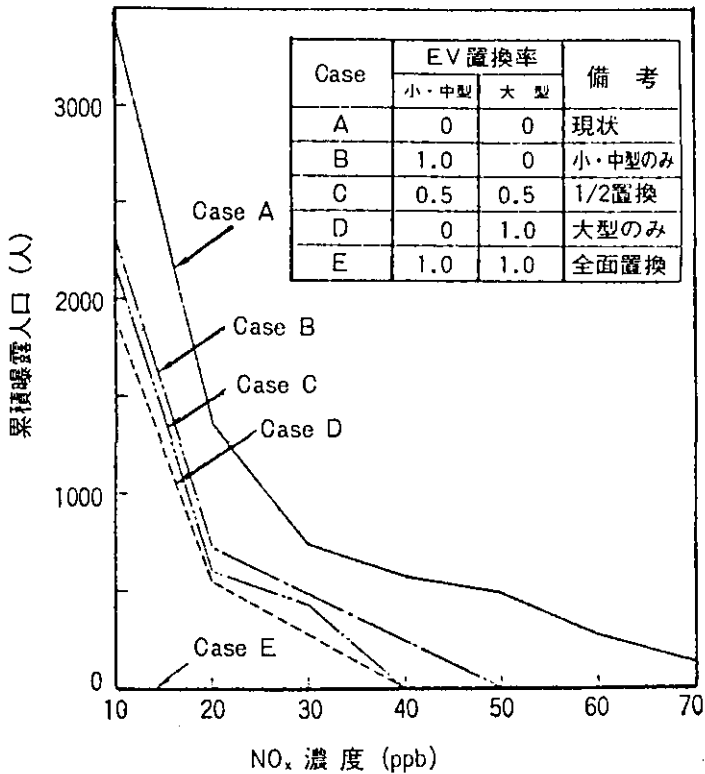


図 2.10 国道6号線をモデルとした電気自動車導入に伴う NO_x暴露人口の変化

大型車の電気自動車も導入すると沿道の大気質は一段と改善される。例えば、全車種にわたりその1/2の台数を電気自動車に置換することにより、環境基準の40 ppbを越える地域に住む人は全くなくなる（Case C）。また、小型車・中型車をそのままにし、大型車のみを完全置換してもほぼ同様となる（Case D）。もちろん、全車種完全置換を行えば道路交通に起因するNO_xなどによる大気汚染が完全になくなることは言うまでもない（Case E）。

以上のように、電気自動車導入による沿道大気汚染の改善効果はかなり大きいとされる。特に大型車の電気自動車化はその効果が著しい。

ここでは窒素酸化物汚染のみを考察対象としているが、前節でも述べられている通り、内燃機関自動車の排ガスがもたらす沿道大気汚染は窒素酸化物のみにとどまらない。これらの窒素酸化物以外の汚染に対しても電気自動車導入が窒素酸化物汚染と同様に著しい効果のあることは容易に推測できる。なお、ここでの計算に用いた数式モデルや交通量などの諸データについては文献13)に詳しく記されている。

次に、騒音について対象地域を窒素酸化物のシミュレーションと同一に選んだ場合についての検討結果について述べる^{14,15)}。

速度 V km/h, 小型車混入率 a_1 , 大型車混入率 a_2 ($a_1 + a_2 = 1$) の交通流の平均パワーレベルは、

$$L_w = 87 + 0.2V + 10 \log_{10}(a_1 + 10a_2) \quad (2.2)$$

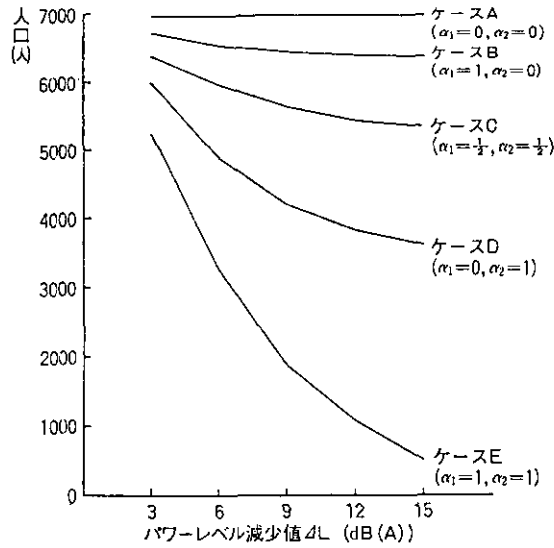
で与えられる。電気自動車のパワーレベルが内燃機関自動車に比べて、小型で ΔL_1 dB, 大型で ΔL_2 dB だけ小さいとすると、平均パワーレベルの変化は、

$$\Delta L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{a_1(1 - a_1(1 - 10^{-\Delta L_1/10}))}{a_1 + 10a_2} + \left(\frac{10a_2(1 - a_2(1 - 10^{-\Delta L_2/10}))}{a_1 + 10a_2} \right) \right) \quad (2.3)$$

となる。ただし a_1 , a_2 はそれぞれ小型車と大型車の置換率である。これらの式を用いて、電気自動車が導入された場合の道路交通騒音の変化を予測する。

電気自動車置換率によって五つのケースを想定し、これらのケースに環境基準（住宅用地で55 dB(A), 商住混合地域で65 dB(A)）を越える地域の居住人口を算出した。

結果を図2.11に示す。ここではパワーレベルの減少値は大型、小型ともに ΔL dB(A) であるとして、3から15 dB(A) の間の値を3 dB(A) ごとにとった。電気自動車により平均10 dBのパワーレベル減少が期待できるとすれば図に示すようにケースDでは基準を超える地域の人口が約4,000人に減少し、ケースEでは1,500人程度になる。このように電気自動車は騒音の低減に非常に有効である。特にケースD, Eのように大型車が全面置換された場合、環境改善の効果は大きい。このことから、道路交通騒音の抜本的な対策の一つとして電気自動車、特に大型車の開発を促進することは有効である。



電気自動車置換率： α_1 (小型車), α_2 (大型車)

図 2.11 国道 6 号線をモデルとした電気自動車導入に伴う騒音の環境基準を超える地域の居住人口 (沿道総人口：約 12,000 人)

2.4 まとめ

ここでは、自動車公害の現状を、大気汚染と騒音の問題に絞って述べてきた。その結果、大気汚染関係で、現在最も深刻な問題である窒素酸化物については、すべての車が電気自動車に替わればもちろん環境濃度が大幅に低減することが示された。なお、本文では触れなかったが、自動車排ガス、特にディーゼル排ガス中のベンゾピレンやニトロピレン等の発ガン性が論議を呼んでいるが、電気自動車では、これらの物質も全く発生しないことは言うまでもない。また、騒音についても著しい改善がなされる見込みである。

現在の車を一部電気自動車に置き替えた場合のシミュレーションの結果では、大型のディーゼル車を電気自動車に置き替えることにより、環境改善が顕著に進むことが示された。

なお、自動車関連の公害に関しては、振動の問題もある。自動車による振動は車体重量に依存する。電気自動車の総重量はエンジン自動車に比べて軽くできる可能性は少ないため、この問題に関しては電気自動車はエンジン自動車に比べて有利であるとは言えない。

引用文献

- 1) 環境庁編 (1986) : 昭和 61 年版環境白書.
- 2) 環境庁編 (1982) : 昭和 57 年版環境白書.
- 3) 環境庁編 (1985) : 昭和 60 年版環境白書.
- 4) 小柳高好 (1986) : 交通公害研究集会発表資料, 筑波.
- 5) 大竹千代子 (1978) : 日本環境図譜, p. 53, 共立出版.
- 6) 今井千郎 (1973) : わが国の窒素酸化物排出状況について, 公害と対策, **14**, 590-596.
- 7) 環境庁編 (1978) : 昭和 53 年版環境白書.
- 8) 二瓶久雄 (1986) : 東京都における自動車からの窒素酸化物の排出量について, 交通公害研究集会資料, 筑波.
- 9) 北林興二 (1982) : 道路近傍における粉塵濃度の解析. 大気汚染学会誌, **17**, 362-369.
- 10) 工業技術院 (1977) : 電気自動車の研究開発.
- 11) 溝口次夫・功刀正行 (1982) : 道路近傍における自動車排出成分の測定法に関する研究. 国立公害研究所研究報告, 第 34 号, 43-48.
- 12) 清水 浩・飯倉善和・溝口次夫 (1984) : 電気自動車の新しい技術の提案—都市型公害の軽減と省エネルギーのために—. 環境技術, **13**, 475-479.
- 13) 乙間末広・篠原正則 (1982) : 大気汚染予測モデルとシミュレーション. 国立公害研究所研究報告, 第 35 号, 55-66.
- 14) 田村正行 (1982) : 騒音予測モデルとシミュレーション. 国立公害研究所研究報告, 第 35 号, 67-77.
- 15) 清水 浩・飯倉善和・乙間末広・田村正行・内藤正明 (1984) : 電気自動車の役割と実用化の可能性. 公害と対策, **20**, 207-214.

3 電気自動車に関する世界の情勢

これまで、電気自動車は日本はもとより世界中の研究機関やメーカーにより、その研究対象とされてきた。ここでは、電気自動車の現状を、研究・開発の体制の面、性能面、最も重要とされている電池、及び普及の4点について検討する。さらに現在まで、電気自動車の普及はほとんど進んでいないが、その理由についても言及する。

3.1 電気自動車の研究・開発の動向

電気自動車の歴史を簡単に振り返ると遠く18世紀後半にさかのぼる。当時は自動車技術の黎明期で、蒸気自動車など数多くの技術が生まれては消えた時代である。その中でも、特に有望だったのが電気自動車と内燃機関エンジン自動車だった。しかし、20世紀に入ると、エンジン技術が急激に向上したのに比べ、電池の性能向上が思うに任せず、電気自動車は忘れ去られる運命にあった。

その後、日本では戦後の燃料難の一時期に、見直されたことがあった^{1,2)}。ヨーロッパに目を向けると、イギリスでは1934年頃から牛乳の宅配用に電気自動車が使われ始め、現在でも1万台以上が毎朝各戸をまわって配達をしている。この目的に特に電気自動車が使われたのは、発進・停止を繰り返す牛乳の配達にはガソリン自動車よりも運行コストが安価であるためと言われている^{3,4)}。

フランスでも第二次大戦中からゴミ収集車として電気自動車が使われ始め、現在でも約200台がパリ市内を走っている^{5,6)}。

これらの先駆的な使用に引き続き、公害問題が世間の注目を集め始めたのに伴い、電気自動車の可能性が再び取り上げられた。

日本では昭和40年(1965年)ごろから一部の自動車メーカーと電力会社が共同で開発を始め、さらに、ほとんどの自動車メーカーと電池メーカーも研究に乗り出した。このような気運の下に、通産省は大プロで電気自動車を取り上げたのが昭和46年のことであった。それから6年間に合計57億円が投じられ、軽自動車から路線用電気バスに至るまで、5車種13台の試作車が作られた⁷⁾。この大プロは世界に先駆けて本格的な研究・開発を行ったという意味はもちろんのこと、電気自動車技術を向上させたという点で世界各国から高く評価されている。ただ、大プロの成果は性能に重点を払ったものなので、価格や信頼性等で実用に供用するには幾多の問題点があった。

そこで、大プロが終了した後、電気自動車を広く普及させるために、電気自動車協議会(EV

協議会)、日本電動車両協会(EV協会)、標準実用電気自動車研究組合(EV技研)の三つの団体が結成された。これらのうち、EV協議会とEV協会の関係は、いわゆる立法府と行政府とに相当しており、EV協議会は普及の基本計画を策定し、EV協会はそれを実行に移すことを主な役割としている。EV協会の主な活動は電気自動車に関する各種調査、メーカーへの試作の委託、広報活動とそれに、普及を進めるために電気自動車を広くユーザに貸し出すリース業務などである。

EV技研は電気自動車に関連する民間会社が、政府の補助を受けて技術開発を行うための団体で、昭和57年までが第一期、それ以後が第二期の開発期間として活動が進められている。EV技研の予算規模は59年度までの6年間に約10億円となっている。政府関係の予算はその後は減る傾向にあり、日本の電気自動車の現状は停滞期に入っていると解釈して良いと思われる。

ヨーロッパの情勢をみよう⁸⁻⁹⁾。フランス、西ドイツ、イギリスなどで大気汚染問題を契機として研究・開発が活発になった事情は日本と同じである。だが、日本ではオイルショックが電気自動車にほとんど影響しなかったのに対し、ヨーロッパ各国ではそれにより加速され、現在でもますます盛んに研究が行われている。ヨーロッパ全体で電気自動車の開発に使われた予算をみると、日本の大プロの時代は、大プロの年間予算の約半分、金額にすると年間5億円程度であったが、1977年ごろから年間10億円ベースとなり、現在では年間20~30億円程度となっている。

ヨーロッパにおける電気自動車の開発と普及の戦略は大型バスやトラックに重点を置くという考え方である。これは、現在の電気自動車の性能や価格を考えると、乗用車のユーザの満足を得ることは難しいという判断と、ヨーロッパ大陸ではバスやトラックによる輸送が盛んで、これらを電気自動車に置き替えるだけでもエネルギーや公害問題に対してかなりの寄与ができるという要因が重なっている。

アメリカでは1976年9月17日に“Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act of 1976”と名付けられた法律が制定されたことにより本格的な研究・開発がスタートした⁸⁻¹³⁾。この法律は6年間に1億6000万ドルの費用をかけて、電気自動車の開発・生産及び普及をしようというものである。アメリカでは一日の石油輸入量が800万バレルという膨大な量である。アメリカは安全保障の見地からエネルギー的に自立するとの政策をとっているが、原油の輸入量を減らす最良の方法として電気自動車に取り上げられたというのが経緯である。

この法律の執行はDOE(エネルギー省)が中心となってなされ、大プロがちょうど終了した1977年から活動が始まった。DOEでは普及を行う第一の分野として乗用車に焦点を合わせている。これはセカンドカーやサードカーの多いアメリカでは性能の多少劣る電気自動車でもかなりの需要が見込めるためである。アメリカにおける、この電気自動車に関する計画は最盛期には年間100億円ベースの予算が投入された。だが、レーガン政権の誕生により、政府関係の研究投資がすべて削減されたことに伴い、電気自動車の研究もベースダウンを余儀なくされた。

この法律の主旨は高性能の電気自動車の開発はもちろんのこと、普及にも大いに力を注ぐということが、日本の大プロとの最も大きな違いであった。このため、アメリカで得られた電気自動車の性能は大プロの成果より見劣りがする。しかし、電池の性能向上などについて、年次ごとの目標がたてられ、一歩一歩前進している様子が見えてくる。

図3.1に、日本、アメリカ、ヨーロッパにおける研究・開発のアクティビティーを示す目安として、年次ごとの電気自動車に投入された政府関係の予算額を示してある。同図より各国の研究・開発の動向のまとめとして言えることは、ヨーロッパに関しては漸進の状況であるが、日本、アメリカでは停滞に向かう状況だと言わざるを得ない。特に、日本の場合にその停滞の度合いが大きい理由を上げてみると以下のようなことが言える。1) 昭和40年代の日本の電気自動車の研究・開発は公害問題からの契機であったが、自動車メーカーの努力と厳しい規制により汚染排出ガスの排出量の削減が進んだこと、2) 欧米ではエネルギーショックが電気自動車の研究・開発に一層の拍車をかける形で働いたが、日本はエネルギーショックを比較的うまく乗り切ったこと、3) 日本では自動車についての各種規制が厳しいため、いわゆるベンチャービジネス的な会社が電気自動車の研究・開発に参入するのが難しいことなどが挙げられる。

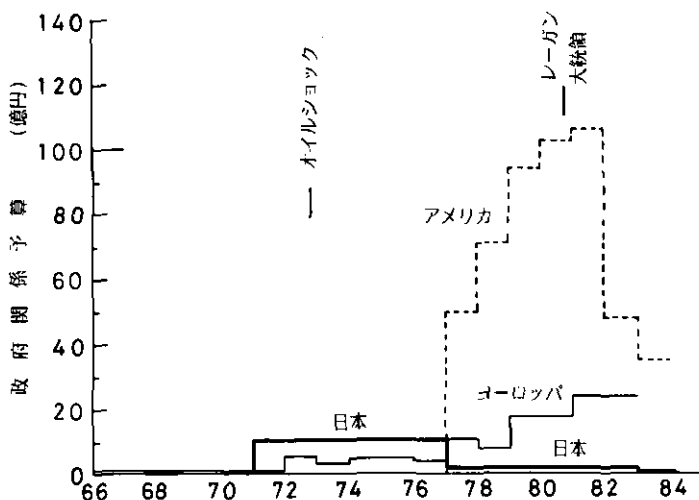


図3.1 各国政府が電気自動車の研究・開発及び普及のために支出した予算額

3.2 電気自動車の性能の現状

電気自動車を製作の目的の上から分類すると、テスト車と実用車に分けられる。また、設計の方法からは、シャシーやボディから電気自動車として作られたものと、エンジン自動車の車体に

電池と電動機を載せたものがある。これらをそれぞれ“オリジナルモデル”及び“改造モデル”と呼ぶことにする。

大プロで開発された乗用車と小型トラックをそれぞれ図3.2と図3.3に示すが、これらはテスト車のオリジナルモデルに属する。EV 技研で試作されたものを図3.4に示すが、これはテスト車の改造モデルとなる。EV 協会がリース制度に使用しているものは実用車の改造モデルに分類できる。また、図3.5は、アメリカで最大の販売実績を持つと言われているエレクトリックコミュータと呼ばれる車であるが、これはオリジナルモデルに属する。

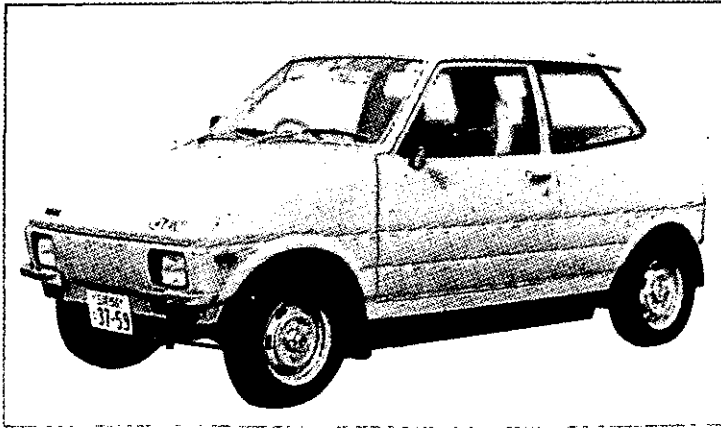


図 3.2 大プロで開発された電気乗用車の外観



図 3.3 大プロで開発された小型電気トラックの外観



図 3.4 EV 技研で試作されたバンの外観

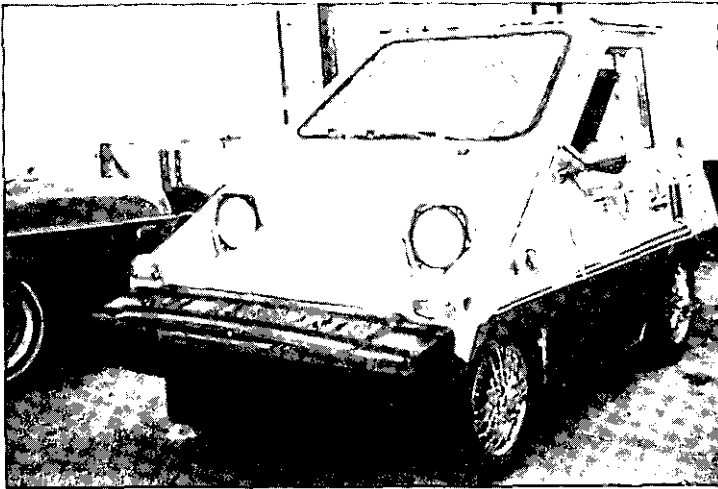


図 3.5 アメリカで市販されている小型電気乗用車
—— エレクトリックコミュータ —— の外観

当然のことながら、オリジナルモデルは、一見して、電気自動車と分かる形をしているが、改造モデルは外見上はこれまでの車と何ら変わらない。一般的に性能上はオリジナルモデルが高く、価格的には改造モデルが安価となる。

電気自動車の性能を評価する代表的な目安は一充電走行距離（これをレンジと呼ぶ）、加速度、最高速度の三つの要素である。特にレンジはエンジン自動車に比べ、現在までの電気自動車が著

しく劣っているため、最も重要視されることが多い。また、実際に電気自動車を使用しているユーザからは加速度についての要求も強い。単位走行距離当たりの電力料金や保守に必要な経費も考慮の対象である。

では、これまでに作られた代表的な電気自動車の性能を紹介しよう。表3.1にはテスト車の例として大プロ⁷⁾とEV技研¹⁰⁾で試作された車の一部及び、DOEとの契約によりジェネラルエレクトリック社が試作したETV 1⁹⁾という型式名の乗用車の性能を示した。この表より、大プロで試作されたものは他に比べてかなり高い性能を持っている。特に、レンジは4モード走行で250kmにもなっている。これは車体をプラスチックにして軽くしたことや、電動機やコントローラーとして高効率のものを開発したことにもよるが、最も大きな寄与をしたのはZn-空気電池を新たに開発して、使用したことである。ETV 1は大プロの成果に比べ、レンジに関しては半分以下の性能である。これは使用した電池の性能の差に最も大きく影響を受けている。ただ、改造モデルであるEV技研の成果に比べるとかなり良い値が出ているのは車両設計の違いが大きな要因となっていると考えられる。

表3.1 テスト用に作られた電気自動車の性能の現状

開発主体 車種 車名	通産省大型プロジェクト		EV技研	DOE
	小型乗用 EV211	小型トラック EV411	軽バン	小型乗用 ETV1
レンジ(定常走行)	455km(40km/h)	496km(40km/h)	130km(40km/h)	187km(56km/h)
レンジ(パターン走行)	250km(4モード)	250km(4モード)		110km(SAE-d)
加速性能	3.6秒(0→40km/s)	4.9秒(0→40km/s)	8.0秒(0→40km/s)	8.8秒(0→48km/s)
最高速度	83km/h	90km/h	75km/h	104km/h
使用電池	亜鉛-空気, 鉛	亜鉛-空気, 鉛	鉛	鉛
電池重量	530kg	1,050kg		490kg

(カッコ内は条件)

表3.2には実用車の性能の例を示す。現在アメリカでは約30種類の乗用車とバンが市販されているが、同表はそれらのうち、1981年にアメリカのボルチモアで行われた国際電気自動車シンポジウムに出展されたものの性能をまとめたものである¹⁵⁾。さらに、この表にはEV協会がリース用に使用している軽乗用タイプの電気自動車の性能も示してある。この表より日本製はアメリカ製に比べて最高速度でやや劣っているほかは同程度の性能である。

レンジについてみると、市街地では60km程度走るのがやっとである。このレンジがどれほど実用的であるかを判断する材料の一つとして、アメリカにおける車の1日の走行距離とその頻度を調べた結果によると、年間を通して80%の日は1日の走行が60km以下である。この結果から、セカンドカーあるいはサードカーとして車を使用するには電気自動車でも間に合うという

表 3.2 アメリカと日本で実用に供するために市販されている電気自動車の性能の現状

生産国		アメリカ			日本
モデル		改造モデル	オリジナルモデル	改造モデル	
車種		乗用	バン	乗用	バン
レンジ 定常走行 (km)	最高	144	96	96	80
	平均	120	88		
	最低	96	80	64	
レンジ パターン走行 (km)	最高	88	72	56	
	平均	64	56		
	最低	48	48	40	
加速 0→48km (秒)	最高	8.8	15	13.9	8
	平均	8.5	11		
	最低	8.0	9	10	
最高速度 (km/h)	最高	120	112	88	80
	平均	112	96		
	最低	80	80	64	

のが DOE を始めとしてアメリカの電気自動車に携る人々の意見の主流のようである。

3.3 電池の性能の現状と将来の見通し

電気自動車の性能を左右する最も大きな要素は電池であることはいうまでもない。電池の性能は次のような項目で評価される。

1) エネルギー密度

単位重量当たりに蓄えられる電力量であり、レンジに大きな影響を与える。単位は Wh/kg で表す。

2) パワー密度

単位重量当たり、単位時間当たりに取り出せるエネルギーである。加速度と最高速度はこれに依存する。単位は W/kg である。

3) 寿命

フル充電と定められた放電深さによる放電を何回繰り返せるかの値である。

4) 充放電効率

充電に使用したエネルギーと放電で取り出せるエネルギーとの比である。

5) 価格

1 Wh のエネルギーを蓄えられる電池の値段を価格と定義している。

これまでに作られた実用車のほとんどは鉛電池を使用している。その理由は上記5項目のうち、エネルギー密度を除くすべての項目がほぼ実用的なレベルにあるためである。しかし、鉛電池を使用した場合、前節でも示したようにレンジが伸びないという問題があり、これを解決するために鉛電池に替わる新しい電池の研究・開発が積極的に行われている。これらの電池は総称して新型電池と呼ばれている。新型電池として研究の対象になったものは数多くあるが、その進展に伴い取捨選択されてきた。DOE では近い将来、実用化の見通しのあるものをニアターム電池、一般に使えるようになるまでにかかなりの時間を要するが、原理的にみて高い性能が期待できるものをアドバンスド電池と分けて研究を進めている⁹⁻¹²⁾。なお、大プロで開発された Zn-空気電池はエネルギー密度は、鉛電池の3倍もあるものの、パワー密度が小さく、寿命も短いということで、これらの電池からは外されている。

ニアターム電池に属するものは従来の鉛電池を改良したものと、Ni-Fe、Ni-Zn の3種類である。表3.3に、これらの電池について DOE が1986年までに達成することを目指して掲げた目標と、1981年現在における実現値を示す¹⁶⁾。また、同表には鉛電池については、日本のEV技研で得られたもの、Ni-Feは松下電器の成果を¹⁷⁾さらにNi-Znについてはユアサ電池で開発したものについて示してある。この表より、総合的にみるとNi-Feが最も良い性能を示しているが、実際には価格が最大のネックである。Ni-Znは寿命に問題がある。また、鉛電池の寿命において日本とアメリカでは大幅な差がある。これは、テスト条件の違いが大きく影響している。なお、現在エンジン自動車用に市販されている鉛電池はエネルギー密度が30 Wh/kg、寿命が600回ほどである。表3.3ではNi-Feが最も良い性能を示しているが価格が非常に高く、現時点で使用可能な電池は鉛電池のみで、その性能は、エネルギー密度45 Wh/kg、パワー密度80 W/kg、寿命は実用的には300回程度と考えるのが妥当であると考えられる。

表 3.3 電気自動車用電池の性能の現状

DOE 目標値			エネルギー密度 (Wh/kg)	パワー密度 (W/kg)	寿命(回)
			56	104	800
電池 の 種 類	ア メ リ カ	鉛	40~41	98~104	95~290
		Ni-Fe	47~88	98~103	327~515
		Ni-Zn	42~68	71~131	79~179
	日 本	鉛	40~48		600~1,200
		Ni-Fe	82		1,000
		Ni-Zn	52		75

アドバンスト電池に属するものには Zn-Cl や Zn-Br などの流体型、Na-S や Li-S 及び Li-FeS などの高温型、メカニカルチャージ型の Al-空気などがある。ここで流体型とは Cl や Br などの正極として使用する物質が流体に溶けた形で用いられるものである。高温型とは常温よりかなり高い温度でのみ電池として動作するものである。さらにメカニカルチャージ型とは、放電の過程で化学変化した物体を充電の形で元に戻すのではなく、再生工場のようなところで、処理するものである。これらの電池はいずれも 100 Wh/kg 以上のエネルギー密度が期待されているが、その実用化は 2000 年ごろになるだろうと予測されている。

なお、最近、電気自動車用電池の現状と将来について高橋らが詳細な検討を行っている¹⁸⁾。

また、最近、プラスチック電池が話題を呼んでいる。この電池の基本的発明は筑波大学の白川英樹教授によるもので、ペンシルバニア大学で研究が進められ、いま、世界中の多くのメーカーが実用化に取り組んでいる。この電池の特徴はエネルギー密度はニアタム電池とそれほど差はないが、パワー密度は 2 kW/kg 近く期待できるといわれている。白川教授によると、現在は寿命や信頼性などに問題があるが、数年の期間で実用化の可能性があるとのことである。この電池が将来の電気自動車用電池の本命になることは十分にあり得る。

以上のように将来を見れば、鉛電池に替わる電池の実用化の可能性は十分にある。それらの開発の進歩が遅いのは研究投資額が十分でないためであるというのが研究に携る多くの人々の弁である。

3.4 普及の現状

日本における普及の現状を眺めてみると、最大の需要先は EV 協会がリースの形で一般ユーザーに貸し出しているものである。このリース制度は EV 協会が軽乗用車、軽トラック、小型バンなどをメーカーに依頼して製作し、3 年ないし 6 年の期間、一般ユーザーに貸し出されるものである。昭和 58 年には 38 台が貸し出された。主な借手は電力会社と、小口の商品の配達サービスを行う会社である。

このほか、現在、電気自動車が実際に使用されている例として京都市の電気バスがある¹⁹⁾。これは京都市の西の郊外に建設が進められている洛西ニュータウンと、阪急電車桂駅を結ぶバス路線の一部として昭和 54 年 5 月から運行が始められた。目的はバス路線の沿線に古くから住む住民の健康被害への影響を考慮のことである。現在 6 台の電気バスが従来からのバスに混じって運行が行われている。このバスは音や振動が少ないことのために乗客にもおおむね好評のようである。ところが、運行費用がかかりすぎることが最大のネックである。特に、この電気バスは、専用に開発された鉛電池を 1 台当たり 3t 積んでいるが、これの原価消却費が大きいのが悩みである。しかし、これは、電池が大量生産されていないことが最も大きな理由で、本質的な問題ではない。

もう一つの例として、現在、EV 協会が進めているものにゴミ収集用の電気自動車がある。ゴ

ミ焼却場では、焼却で得られる熱を利用して発電を行うことが一般化しつつある。このようにして得られる電力は発電コストが安いことが利点であるが、得られる電力量や周波数の安定性に問題があるため、電力会社への販売価格は安くならざるを得ない。このため、このような電力を有効に利用することと、ゴミ焼却場のイメージアップを図ることの2点の理由から、ゴミ収集車を電気自動車という計画が進められている。この計画はEV協会が主体となり、富士重工、日産自動車などのメーカーと、ユーザである横浜市などが協力体制をとって進めている。実車は既に完成し、現在はゴミの収集業務を行いながら走行テストが続けられている。

これら、電気自動車を積極的に使うための試みが一方では成されているものの、これまで試用していたユーザがその使用をあきらめるというケースも多いということが聞かれる。その最も大きな理由は、電気自動車で得られる性能に対して、コストが高いということである。現在、軽自動車クラスの電気自動車は1台200万円程度といわれている。同クラスのエンジン自動車に比べて約3倍の価格である。この価格の溝を埋めるために行われているのがEV協会のリース制度であるが、それでも月額47,000円というのは一般ユーザにとっては高すぎる金額である。

アメリカにおいては、電気自動車に対するDOEの方針が、電気自動車の高性能化のための研究・開発を促進することはもちろんのこと、普及のためにもかなりの予算を割くということであった。そのための方策として、電気自動車を開発するベンチャー企業に予算を配分して育成することと、地方自治体や大量に車を使用する公共的なユーザに補助金を出して試用に供することが積極的に行われた。また、一般の人々の電気自動車に対する関心も比較的高く、個人所有のものもかなりある。この背景にはアメリカでは個人が作った車でも条件を満たせばナンバーを取得することが可能なことがあげられる。そのため、いわゆる“Do it your self”で作られた電気自動車の数もかなり上る。

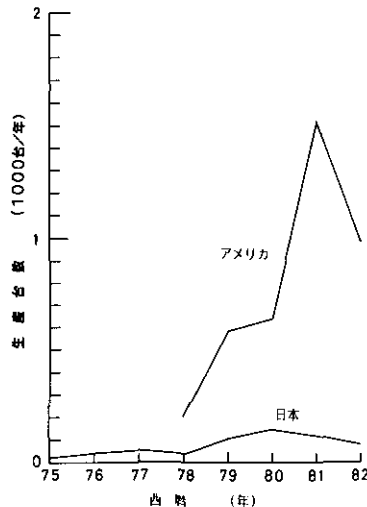


図3.6 最近の日本及びアメリカの電気自動車の年間生産台数

図 3.6 に、最近の日本^{1,2)}及びアメリカ^{11,12)}の電気自動車の生産台数を示す。同図より、アメリカは日本より約 1 けた多い生産が成されていることが分かる。また、アメリカの統計は自動車メーカーによって生産されたもののみが、集められており、個人で作られたものは含まれていないため、実際はこれよりも多い。

以上のように電気自動車の普及の現状をつかむことは、統計の取り方や発表されるソースにより異なるためにむずかしいが、いずれにせよ、ごくわずかの台数が実用に供されているに過ぎない。

3.5 電気自動車の普及の見通し

電気自動車の普及の予測は電気自動車の研究・開発に携ってきた多くの機関によって成されている。

まず、日本の例について眺めて見る。電気自動車協議会は昭和 52 年 4 月と 58 年 12 月に「電気自動車普及基本計画」を作成している¹²⁾。これらによると昭和 52 年には、それまでの普及台数が 400 台であったが、9 年後の 62 年には普及台数が 20 万台との目標を立てた。しかし、昭和 58 年の段階での普及はわずか 580 台にとどまっておき、62 年における 20 万台普及という目標の達成は極めて困難であるとの見通しだった。そこで昭和 58 年に再び基本計画が策定され、昭和 65 年における目標として、年産 1 万台、保有台数 1 万 5 千台という数字が示された。そして、この年までに大量生産を可能とする電気自動車専用工場を建設する計画が立てられている。

アメリカでも多くの機関が普及の予測を立てている。1979 年における DOE の予測では 1979 年の生産台数が 600 台に対して、1983 年には 7500 台、1990 年には 20~50 万台となると予測している。同様に GM では、1990 年に年間 20~30 万台との見積もりを示している¹¹⁾。また、アメリカの四つの機関による 1980 年になされた、1990 年と 2000 年における予測の結果を表 3.4 に示す¹²⁾。同表によると、予測を立てた機関ごとにはばらつきが大きいですが、2000 年には少なくとも見積もっても 60 万台、多ければ 830 万台の年間生産台数が見込まれている。ちなみに、現在の日本の 4 輪車の生産台数は年間約 1000 万台である。さらに 1984 年の報告によると²⁰⁾、ANL (アルゴンヌ国立研究所) の予測では西暦 2000 年の電気自動車の保有台数が 300 万台から 2400 万台、2020 年には 3000 万台から 1 億台となっている。同様に 1984 年の報告によると、EPRI (アメリカ電力研究所) が 20 編の研究報告をまとめた結果、2000 年における普及台数が 700 万台という数字を示している。この値を得るに当たっての条件として、ガソリン価格が現行通りであり、電気自動車の性能としてレンジが 100 マイルを想定している。そして、ガソリン価格が倍となれば電気自動車の普及台数も倍になるだろうと予測している。

以上のように、電気自動車の性能は現在のものから多少の向上があれば、普及は順調に進むものという予測が日本でもアメリカでも成されている。しかし、現実には電気自動車はこれまでに世界中で研究・開発が進められたにもかかわらず、その普及はごくわずかである。その理由とし

ては以下の3点が挙げられる。

- 1) レンジ、最高速度、加速度のいわゆる動力性能が、現在の一般的な車の使い方から見て著しく劣っている。
- 2) 価格が著しく高い。維持費も場合によっては高い。
- 3) 充電設備や保守設備などの社会的な受け入れ体制が整備されていない。

表 3.4 アメリカにおける電気自動車の生産台数と普及台数の予測

予測設定時期	1979		1980				1984	
予測設定機関	DOE	GM	SRI	ANL	PU	Eaton	ANL	EPRI
目標年次								
1979	600							
1983	7500							
1985			1万	1.6-7万	12万	7000		
1990	20-50万	20-30万	6万	6.9-42万	130万	3万		
2000			60万	96-834万	660万	200万	(300-2400万)	(700万)
2020							(3000万-1億)	

注 カッコなしは年間生産台数、カッコつきは普及台数

DOE: Department of Energy GM: General Motors SRI: Stanford Research Institute

ANL: Argonne National Laboratory PU: Padue University

これらの問題点を解決するために、これまでの研究・開発や、普及のための施策を施すに当たって、どのような試みが成されてきたのであろうか。まず、日本の例について眺めよう。

日本の電気自動車の研究・開発に当たって、世界的に見て注目されるべきは大プロによる電気自動車開発であることは既述の通りである。この大プロを始めるに当たって、計画を立案した人々がどのような見通しや目標をもっていたかを知るために参考になるのは、昭和44年6月に提出された「電気自動車総合調査報告書」という表題の600ページにわたる報告書である²¹⁾。この報告書は、向坊隆委員長（当時東京大学教授）の下での電気自動車総合調査委員会による調査活動の結果をまとめたものである。内容は自動車の利用、電気自動車技術、交通システム、エネルギー資源、電気自動車の海外調査の5部門について120名に上る委員により詳しい調査が行われた結果をまとめたものである。

この報告によると、利用調査については電気自動車は動力性能が劣るということを前提として、利用可能な分野の洗い出しを行い、電気自動車に代替可能な業務を拾い上げている。それらには計11業務が含まれているが、例をあげると牛乳配達用を含む各種配達用、電話工事などの小規模な工事用などである。これらの業務が選ばれた条件は1日の走行距離50~60 km、最高速度50 km/hで、夜間充電可能なことである。

電気自動車技術については、電池について深く言及していることは当然である。さらに、車体の軽量化、空気抵抗の低減、タイヤの転がり摩擦の低減など走行における電力の損失を極力抑える技術の開発が重要であることが強調されていることは注目に値する。また、新しい方式の電動機や、コントローラーの開発も必要であることも報告されている点も重要である。

交通システムの部門では、電気自動車を新しい交通システムの一環として積極的に取り入れていくことが提案されている。

このような報告を受けて始められた大プロは昭和46年から48年までを第一期、それ以後51年までを第二期として進められた。第一期には第一次実験車と呼ばれる5種類の試作車が作られた。製作された車種はトラックタイプと乗用車タイプの二種類について、軽自動車クラスと大衆車クラスの計4種類と路線用の電気バスである。この第一期の開発目標はこれまでのエンジン自動車にどれだけ性能が近づけられるかということであった。そのために、車体設計に幾つかの工夫が成されたものがある。例えば、ボディをプラスチック化することにより軽量化を図る試み、製造工程を高精度化することによる電動機の軽量化の試み、電動機を左右の駆動輪にそれぞれ1個ずつ接続し、差動装置の替わりをさせることにより損失の低減を目指したホイールモータシステムの採用等である。しかし、電気自動車総合調査報告書で強調された空気抵抗や転がり摩擦抵抗の低減などに積極的に取り組んだという形跡は見当たらない。

第一期の開発の結果、電気自動車の開発においては特にレンジの向上が望まれ、それには高いエネルギー密度の電池の実用化が不可欠であるとの結論に達した。そのため、第二期の開発においては電池の開発にほとんどの努力が割かれたと言って良い。その結果それまでの鉛電池に替わって、空気-鉄、鉄-ニッケル、亜鉛-空気、改良亜鉛などの各電池の開発が急がれ、相次いで試作車に搭載された。こうして、表3.1に示されているようにレンジについては輝かしい性能を得ることができた。しかし、最もエネルギー密度の高いZn-空気電池は実用上問題が多いため、その後の開発においてはその目標からも外されていることは3.3で述べたとおりである。

大プロの終了後、EV協会を中心として、普及のための活動が始まる。その方針は電気自動車総合報告書の利用調査の結果と方向が同一で、電気自動車に代替可能な業務に普及を進めるということであった。そのため、大プロで追及された電気自動車の高性能化は必ずしも大きな目標ではなくなり、価格や製造の容易さといった点に重点が移されることになった。したがって製造される車も、これまでのエンジン自動車をベースとした改造車がすべてとなった¹⁹⁾。また、大プロでの成果としては改良された鉛電池や、コントローラー用の電子回路などはこれらの改造車で再び採用されたものもあるが、新型の電池、軽量化された電動機の技術、ホイールモータ技術などは、技術が未熟ということで切り捨てられたものもかなりある。

こうして始まった普及活動であるが、初期にはもの珍しさも加わって電気自動車の使用を試みた個人や企業も多かった。しかし、次第にその熱も薄れ、買い替えの時期には再びガソリン自動車に乗り替えるケースが多いと聞く。その最大の理由はコスト・パフォーマンスということに尽

きると思われる。確かに特定の業務や目的には現在の電気自動車の性能で置き替えることが可能である。しかし、それは現在のエンジン自動車の性能でも十分に目的が果たせる。しかも価格や社会的受け入れ体制はガソリン自動車に圧倒的に分がある。これに対して、普及に携ってきた人々は、ユーザのボランティア精神に多くを期待していたように思える。すなわち、公害問題やエネルギー問題の解決に電気自動車は役にたつという電気自動車にとっての良いイメージのみが強調され、その利点のみでユーザに訴えようとしたように思われる。しかし、そのみではユーザは電気自動車を使用してくれないことが、約10年にわたる普及活動の結果、次第に明確になってきたように思われる。

同様のことは世界的な傾向としても言えるのではなかろうか。アメリカにおいてもヨーロッパにおいても、電気自動車の普及は電気自動車でも間に合う分野から始めるべきだという考えが主流である。そのため、アメリカでは1回の走行距離の少ないセカンドカーやサードカーをターゲットとしているし、ヨーロッパではバスやトラックを主体としている。しかし、これらの国々においても、このような方針が定着しないであろうということは、図3.6に示したように、生産台数がこのところ下がり気味だという事実から容易に想像できる。

このように、ユーザのボランティア精神に期待するのは望み薄であるというのは普及に携える人々の間でも定着しつつあるように思われる。そして、その打開策として国や公共団体に援助を求めるべきだという声も強くなってきている。例えば電気自動車しか入れない地域を設定するか、税金の優遇措置を施すなどの方法が提案されている。だが、これらの方法を採用するほどの社会的要請が現在のところ、それ程高くないと言うのも事実である。

再び電気自動車総合調査報告書に戻って、何故電気自動車の普及が今日まで困難であったかをまとめてみると、

1) 電池開発が電気自動車の技術開発に不可欠であると言われ、大プロではこれに最重点が置かれたが、飛躍的に高性能の電池の実用化までに至らなかったこと。

2) 電池以外の車体構造などの電気自動車に関連した技術についても技術開発の必要性が叫ばれたが、それを積極的に推し進める試みは少なかったこと。特に普及を進めるに当たっては改造車という枠内で、よりよい電気自動車を作るための努力が払われてきたため、その性能向上には限界があること。

3) 普及の重点が、電気自動車でも使える分野で行うべきという方針に置かれたが、それが多くのユーザの共感を呼ぶには至らなかったこと、の3点が挙げられる。

以上3点のうち、いずれか、あるいは、すべてが解決されなければ、電気自動車の普及は困難であると考えられる。

3.6 まとめ

ここでは、電気自動車に関する世界的な情勢を眺めてきた。電気自動車の開発・研究は公害問

題やエネルギー問題の顕在化に伴い活発化したが、現在は大幅な性能向上が達成されないままに、沈静化の方向にある。電気自動車の性能向上には、高性能電池の開発が不可欠だと言われているが、現状では、総合的な性能において鉛電池に勝るものはない。

電気自動車の性能向上が思わしくないことと、価格も現在のガソリン自動車に比較してかなり高価であることが手伝って、普及も遅々として進んでいない。普及を進めるために、法的な施策や規制を設けるべきだとの意見もあるが、現状では望み薄である。

電気自動車の現状を客観的に観察すれば、以上のように、悲観的な結論しか導くことができない。しかし、第2章で述べたように、自動車公害に抜本的な解決策を与えるためには、電気自動車の導入が極めて重要であることも明らかである。

引用文献

- 1) 電気自動車協議会 (1977) : 電気自動車普及基本計画.
- 2) 電気自動車協議会 (1983) : 電気自動車普及基本計画.
- 3) 杉谷正広 (1980) : 欧州の電気自動車事情 (昭和54年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 4) 桑原忠夫 (1981) : 欧州の電気自動車事情 (昭和55年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 5) 岡田 清 (1978) : ヨーロッパの電気自動車事情 (昭和53年度海外調査報告書).
- 6) 松尾武司 (1982) : 欧州の電気自動車事情 (昭和56年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 7) 工業技術院 (1977) : 電気自動車の研究開発.
- 8) 井口雅一 (1978) : アメリカの電気自動車事情 — アメリカの電気自動車及びハイブリッド車の開発について —. 電気自動車協議会.
- 9) 石井 進 (1980) : 米国の電気自動車事情 (昭和54年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 10) 水野慶之 (1981) : 米国の電気自動車事情 (昭和55年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 11) 服部政策 (1982) : 米国の電気自動車事情 (昭和56年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 12) 坂本 剛 (1983) : 米国の電気自動車事情 (昭和57年度海外調査報告書). 電気自動車協議会.
- 13) Shacket, S. R. (1979) : The Complete Book of Electric Vehicles. Domus books, Chicago.
- 14) EV 技研 (1981) : EVERA Publicity. 第2号.
- 15) 清水 浩 (1982) : 電気自動車—アメリカからの報告. 技術と経済, 178, 99-108.
- 16) Yao, N. P., C. C. Christianson and F. Hornstra(1981) : Prospect of advanced Lead-Acid, Nickel/Iron and Nickel/Zinc batteries for electric vehicle applications, IECEC'81, No. 9320.
- 17) 光亦忠泰・高橋勝弘・北村栄成・岩城 勉 (1978) : 鉄-ニッケル電池. National Technical Report, 24, 330-336.
- 18) 高橋祥夫・二亦政之・荻野 勲・樋口俊一・岡崎 進 (1986) : 電気自動車用電池の開発状況調査. 日本電動車両協会.
- 19) 日本電動車両協会 (1980) : 電気バスのデモンストレーション事業報告書.
- 20) Madar, G. M. and R. Knight(1984) : Electric vehicles : A desirable new load for electric utilities within a decade, Proceedings of the IECE'84, No. 849288.
- 21) 電気自動車総合調査委員会 (1969) : 電気自動車総合調査報告書.

4 電気自動車の性能向上の可能性

前章までの議論から、自動車公害の抜本的な解決には電気自動車の大量普及が必要であるが、機能や価格の現状から、それは困難であることが明らかとなった。そして、電気自動車の性能向上には電池の性能向上が不可欠であるというのが一般的な見解であるにもかかわらず、総合性能において鉛電池に勝るものが開発されるのは当面望み薄と考えるのが妥当である。ところで、この10年間程を振り返ると、電気自動車の性能向上に役立つ技術が幾つか開発されつつある。これらの技術の最新のものを採用し、新しい電気自動車を設計すれば、電気自動車の性能はどこまで向上させられるであろうか。このような観点から、ここでは電気自動車の性能向上性を、技術的な見地から解析する。

4.1 性能向上のための基本的考え方

前章の議論から電気自動車を大量普及させるには、ユーザ側の立場に立つと、電気自動車は、ガソリン自動車と比べてあらゆる面を総合して実用的に見て遜色がないというのが必要条件である。しかも、いくつかの面では、ガソリン自動車と比較して大きな利点がなければならぬ。ここで、車に要求される条件をリストアップし、各項について現在の電気自動車とエンジン自動車を比較したのが表4.1である。同表によると、動力性能が劣り、購入費用がかさむことが問題である。しかし、購入費用については大量生産がなされているか否かにその原因があり、本質的な違いではない。したがって、電気自動車は動力性能のみ実用的なレベルに向上させることが当面の目標となる。

では、現代の電気自動車は動力性能面でどれだけ劣っているのかを見るために、1台の車に積載可能で、有効に使用することが可能なエネルギーの量を電気自動車とガソリン自動車について比較したのが表4.2である。同表では、ガソリン自動車に関しては大衆車クラスを仮定している。同表によると、有効エネルギーに関しては電気自動車はエンジン自動車の約1/4しか積めないということになる。この1/4をほぼ1に近づけることが電気自動車の動力性能向上の目標となる。この問題を解決するための最も手っ取り早い方法はエネルギー密度の4倍大きな電池を使用することである。しかし、将来、その可能性はあるものの、現在の技術で使用できるのは、鉛電池のみである。そこで、新しい技術を駆使して、電気自動車の走行に要するエネルギーを極力減らす考え方が浮上してくる。すなわち、電気自動車に省エネ化を図るということである。以下、このような考え方を採用する電気自動車を“省エネモデル”と呼ぶことにする。この考え方は、電気自動車総合調査報告書の中でも強く主張されていた。しかし、大プロの開発期間の間ではそ

表 4.1 エンジン自動車と比較した、現状での電気自動車の特性

項 目	特 性
動力性能	
レンジ(一充電走行距離)	著しく劣る(約1/4)
最高速度	少し劣る
加速度(0~400m 加速)	かなり劣る
費 用	
購入費用	かなり高い(約3倍)
維持費	ほぼ同等
公害関連	
排ガス	なし
騒音	著しく少ない(約1/10)
エネルギー関連	
総合効率	良好(約1.5倍)
代替性	可能(石炭, 原子力, 水力等)
その他	
安全性	良好(衝突時火災なし)
居住性	良好(振動, 騒音少なし)
運転の容易さ	容易(エンストなし)
保守性	良好(構造簡単)

表 4.2 1 台の車に積載できる有効使用可能なエネルギー

	ガソリン自動車	電 気 自 動 車
単位当たりエネルギー	11,000Wh/l(ガソリン)	48Wh/kg(鉛電池)
1台当たりエネルギー	440,000Wh(40l)	19,000Wh(400kg)
有効エネルギー	57,000Wh	15,000Wh
比		3.8倍

れが実用化に至らなかったわけである。ところが大プロ終了後今日までの約 10 年間の間に、急速にそれらに関連する諸技術が向上し、実用化されつつある。したがって、それらを再び集積して新しい電気自動車を作れば、その性能が著しく向上させられるのではないかということである。このことは次のようにも解釈可能であろう。電気自動車総合調査報告書がまとめられた時

代、あるいはこの報告書に基づいて大プロが始められた時代は、いわば社会的な要請が先行した状態での技術開発だった。そのため、「電気自動車を支える技術が未成熟であった。それが、この10年程の間に発展が進んできた」ということである。なお、3.2節で定義したオリジナルモデル及び改造モデルのうち、これまで作られた電気自動車は改造モデルがほとんどだった。したがって、本章での検討で、従来型の電気自動車を比較の対象とするには、改造モデルで代表させる。

以下に、具体的な省エネの技術と、それらを用いて得られる省エネ型電気自動車の性能について述べる。

4.2 電気自動車におけるエネルギー消費過程と省エネの可能性

電気自動車とエンジン自動車がそれぞれ、加速、減速を繰り返しながら走行する場合の、発動機を除く主なエネルギー損失の過程を図4.1の上半分の模式的に示す。すなわち、両者に共通の項目として、空気抵抗、タイヤの転がり摩擦抵抗、ブレーキによる損失、発動機からタイヤにエネルギーを伝達する過程での損失がある。また電気自動車特有の項目としては、電池内部での損失、エンジン自動車ではアイドル損失があり、両者とも大きく分けて、五つの項目でエネルギーが消費されている。ちなみに、図4.1の下半分を用いて省エネの効果を結論的に述べると、エンジン自動車では現在の省エネ技術で、転がり摩擦抵抗と空気抵抗を大幅に減らすことができるが、他の項目について現時点で著しく効果をもたらす技術は存在しない。だが、電気自動車では、電気自動車特有の省エネ技術も加味することにより、それぞれにかなり効果が得られる。しかもその結果、相乗効果が働き、さらに使用エネルギーが小さくできる。

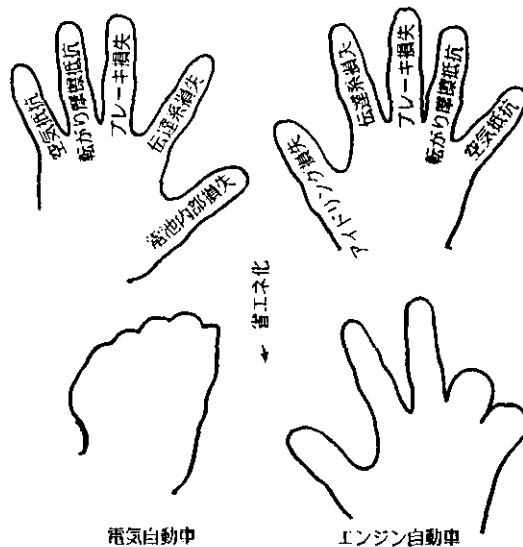


図4.1 電気自動車とエンジン自動車の主なエネルギー損失の項目と省エネルギー化の効果

電気自動車の走行時のエネルギーの損失を、より具体的な形で表現したのが図4.2である。電池に蓄えられた電力エネルギーは、電池内部で、損失を受け、速度制御のためのコントローラーに伝わり、電動機を回転させる。電動機で発生した機械エネルギーは、伝達機構を通して車輪を回転させるのに使われる。車輪の回転エネルギーは、定常走行時にはタイヤの転がり摩擦抵抗と空気抵抗で消費される。また加速時には運動エネルギーにも変換される。そして、この運動エネルギーの一部が、減速時にブレーキで消費される。

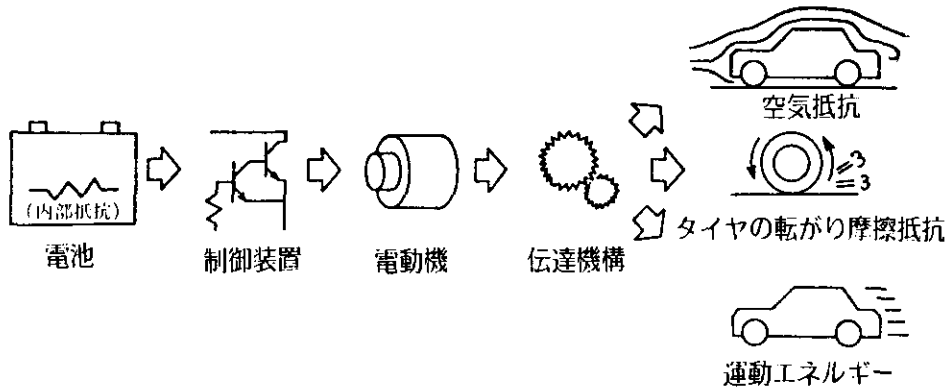


図4.2 電気自動車の走行時のエネルギーの流れ

以下、エネルギー損失の各項目の各項目について検討を加えると同時に、損失の低減法についても考察する。

4.2.1 電池の内部損失

電池は単位時間当たりに取り出すエネルギーすなわち放電率が増加するに従い、内部抵抗その他による損失が増加する。放電率と損失の関係は、電池の種類や製造方法により異なるが、大プロで開発された鉛電池について矢田らが行った測定の結果では、次の式が得られている¹⁾。

$$\begin{aligned}
 E_{be} &= E_b(-0.534 \log C_r + 0.598) \quad (C_r > 0.2C) \\
 &= E_b \quad (C_r \leq 0.2C)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

ここで、 C_r は4モード走行時の平均の放電率、 E_b は放電率0.2Cにおける単位重量当たり蓄積できる電力エネルギー(エネルギー密度)、 E_{be} は有効に使用できるエネルギーである。これまでの電気自動車では C_r の値が0.5C程度であったので、 E_{be} の値は E_b の75%程度で、約25%の電力エネルギーが電池内部で消費されていたことになる。 E_{be} を増やすには C_r をできるだけ小さくすればよいが、それは、省エネを施すことにより可能となる。

4.2.2 タイヤの転がり摩擦抵抗

車の転がり摩擦抵抗は F_r は、

$$F_r = \mu M_t \quad (4.2)$$

で表される²⁾。ここで μ は転がり摩擦係数、 M_t は総重量である。 μ と M_t の双方を小さくすることにより F_r を小さくすることが可能となる。

タイヤの μ を小さくするために、これまで、種々の方法がとられてきた³⁾。約 10 年程前までは、タイヤの主流はバイアスタイヤであった。ヨーロッパにおいてラジアルタイヤが発明されると、それが世界中に広がり、現在では乗用車用タイヤのほとんどはラジアルタイヤに置き替わっている。また、トラック・バス用でもラジアルタイヤに置き替わりつつあり、二輪車用タイヤでも間もなく市場に姿を見せ始める。ラジアルタイヤとバイアスタイヤの機能上の違いはラジアルは固く、変化しにくいということである。そのために、乗り心地は多少劣るものの、高速安定性や制動能力に優れ、かつ μ が著しく小さいということが特徴である。したがって、タイヤをラジアル化することが、 μ を小さくする一つの有効な手段である。

また、タイヤのゴムの性質を変えることも重要である⁴⁾。この場合、例えば、スチレン-ブタジエンポリマー等を大量に使用すると、 μ の低下には効果的である。しかし、このような方法での μ の低下はすべり摩擦係数の低下にもつながり、安定性の面で問題がある。この問題を解決する方法として、転がり摩擦とすべり摩擦に関与するタイヤの振動数が、それぞれ 500 Hz 以下、及び、それ以上にピークがあることが分かってきたが、この周波数特性を考慮することにより、転がり摩擦が小さくすべり摩擦の大きいゴムが得られるようになってきている。

その他、 μ の値に影響を与える要因には、タイヤの直径、幅、空気圧がある。直径は大きい程、幅は広い程、空気圧は高い程、 μ は小さくなる⁵⁾。乗用車タイヤにおける空気圧と μ の関係を図 4.3 に示す。これは、ヨコハマゴムにおいて、5 本のラジアルタイヤについて、測定されたものであるが⁶⁾、同図によると、標準の空気圧が 1.7 kg/cm^2 の際に、空気圧 P_h を変化させると、ほぼ、次式の関係があることが見いだされている。

$$\mu_p = \mu_0 (1.027 P_h^{-1.375} + 0.528) \quad (4.3)$$

ここで μ_p 、 μ_0 はそれぞれ空気圧 P_h 及び標準の空気圧 P_0 における転がり摩擦係数である。現在、一般のバイアスタイヤでは、 μ の値は表 4.3 に示すように 0.025 程度、低転がり摩擦化を図った一般市販のラジアルタイヤでは 0.01 程度である⁵⁾。オートメカニクス誌の記事によると、同誌のテストにおいては、市販の省エネルギー型ラジアルタイヤでは最小値が $\mu = 0.007$ のデータが得られている⁷⁾。また、マツダが同社の省エネルギー型ガソリン自動車のために試作したタイヤでは、テストデータとして $\mu = 0.005$ の値が得られている⁸⁾。

電気自動車用タイヤとして、サイズや空気圧等に多少の考慮を込めれば、 $\mu = 0.007$ の値のタイ

ヤを得るのはさして困難ではなく、マツダで試作したタイヤの例から見て0.005の実現の可能性もある。

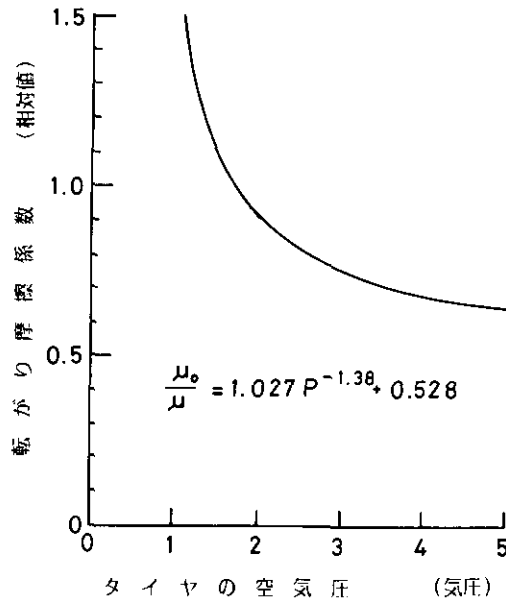


図 4.3 乗用車用タイヤの空気圧と転がり摩擦係数の関係

表 4.3 各種乗用車用タイヤの転がり摩擦係数

タイヤの種類	μ
バイアス	0.015
ラジアル	0.01
省エネルギー (1982年)	0.007
(1984年)	0.005

4.2.3 総重量

総重量を減らすことは式(4.2)に示すようにタイヤの転がり摩擦抵抗を減らすことに効果がある他、運動エネルギーの低下、ひいてはブレーキ損失を減じる効果もある。さらに加速時の電動機の効率を向上させる上でも有効である。

総重量はシート、窓などエンジン自動車と共通の部分、モーター・コントローラー、電池、ボディ・フレーム、及び乗車定員(荷重)の和である。これらのうち、共通部分については、エン

ジニアリングプラスチック等の新素材を使用することにより軽量化が可能となる。また、ボディ・フレームについても、アルミニウム、高張力鋼、カーボンFRPなどの新しい材料により軽量化が可能となる。

これらの軽量化の技術を用いると、電気自動車の重量はどの程度にまで低減できるものであるかを、(株)東京アールアンドデーに委託して計算を行った。以下、その結果の概略を記す。

大衆車クラスのガソリン自動車において、電気自動車との共通部分の典型的な重量を表4.4に示すが、その重量は322 kgである。また、ガソリンエンジン車に特有な部分の重量を表4.5に示す。なお、ここで取り上げたクラスのエンジン自動車のボディ・フレームの重量は約180 kgである。乗車定員を4名とすると、表4.4、4.5より、総重量は988 kgである。

表4.4 大衆車クラスのガソリン自動車の電気自動車との共通部分の典型的な重量

部 位 名	主 な 材 質	重 量 (kg)
ウインドウ	ガラス	38
インテリア		
トリム	ABS 等	44
シート	スチールフレーム	55
ダッシュパネル		12
スイッチ		2
ワイパー	スチールアーム	4
ランプ	ガラスレンズ	6
FR アクスル	スチール	30
ブレーキ	鋳鉄	10
サスペンション	スチール	22
RR アクスル	スチール	30
ブレーキ	鋳鉄	10
サスペンション	スチール	22
ペダル, マスタシリンダー	スチール	5
ステアリング	スチール	12
FR バンパー	ポリプロピレン	10
RR バンパー	ポリプロピレン	10
小 計		322

表 4.5 大衆車クラスのカソリンエンジン自動車に特有な部分の重量

部 品 名	重 量 (kg)
ドライブシャフト	8
エンジンパーツ	8
EXH マフラー	15
クーリング	15
フューエルタンク	12
フューエルパイプ	2
クラッチコントロール	1
ミッションコントロール	4
エンジン (トランスミッション含む)	145
バッテリー	10
ガソリン (50l)	40
クーラント (3l)	2
オイル (3l)	2
小 計	266

一方、軽量化を図った電気自動車では共通部分の重量は表 4.6 に示す通りである。ここでは、窓にポリカーボネートを使い、アクスル、ワイパー、ステアング、シート等において、鉄が使われている部分は、すべて、アルミニウムに置き換えている。また、インテリア部分のプラスチックには、高強度のエンジニアリングプラスチックを用い、ブレーキにはカーボンコンポジットを用いてある。同表よりこれらの新素材を使うことにより、125 kg の軽量化が可能となる。

次にボディ・フレームについてはこれまでは冷間圧延鋼板が主な材料として使われていた。この材料を用いた場合と全く同じ形状のボディ・フレームで、しかも、材料のみを高張力鋼板、高張力アルミ板、ハニカム構造のカーボン FRP を取り替えるものとした場合、安全性を犠牲にせずにとだけ軽量化できるかを求めた。表 4.7 にはそれぞれの材質の機械的性質が示されている。ボディ・フレームの設計においては、剛性と強度がそれぞれ十分であることが要求される。冷間圧延鋼板に比べ、剛性はほぼ同じで、強度はより強いという条件を設定し、しかも、一般的に用いられる材料の厚さを基準とした場合の、それぞれの材料に必要な厚さは表 4.8 に示すごとくとなる。この場合の強度を示す目安である余裕係数、剛性の目安となる剛性比較係数及びボディ・フレームの重量も表 4.8 に示す。同表より、高張力鋼板を使用する場合で、24 kg 軽量化でき、高張力アルミ板及びハニカム構造のカーボン FRP ではそれぞれ 53 kg と 109 kg 軽量化できる。

表 4.6 軽量化を図った電気自動車のガソリンエンジン自動車との共通部分の重量

部 位 名	主 な 材 質	重 量 (kg)
ウインドウ	ポリカ	18
インテリア		
トリム	改質エンビ	22
シート	アルミフレーム	36
ダッシュパネル		6
スイッチ		2
ワイパー	アルミアーム	3
ランプ	プラスチックレンズ	4
FR アクスル	アルミ	23
ブレーキ	カーボンコンポジット	5
サスペンション	アルミ	12
RR アクスル	アルミ	23
ブレーキ	カーボンコンポジット	5
サスペンション	アルミ	12
ペダル、マスタシリンダー	アルミ	4
ステアリング	アルミ	8
FR バンパー	ポリプロピレン	7
RR バンパー	ポリプロピレン	7
小 計		197

さらに、任意の電池重量を m_b 、任意の電動機及びコントローラーの重量を m_m とする時の電気自動車の総重量 m_t を求める。ここで、仮定として、ボディ・フレーム重量 m_f は総重量に比例するものとする。すなわち、

$$m_f = K_f m_t \quad (4.4)$$

とする。

冷間圧延鋼板を使った場合、 m_t が 988 kg の時、 m_f が 180 kg であるから、 K_f は 0.182 である。

表 4.7 ボディ・フレーム用新素材の機械的性質

	引張強さ kg/mm	弾性率 kg/mm	比 重	比強度	比弾性率
冷間圧延鋼板 (SPCC)	28	19600	7.86	1	1
高張力鋼板 (AFPC45)	47	19600	7.86	1.68	1
高張力アルミ板 (7NO1)	37	7300	2.78	3.73	1.05
カーボン FRP (CFRP)	59	5000	1.55	10.7	1.29
アラミド繊維 (ケブラー45)	20.0	2080	1.32	4.26	0.63

表 4.8 各新素材を用いた場合のボディ・フレーム重量の比較

材 質	板厚(mm)	余裕係数	剛性比較係数	ボディフレーム重量(kg)
冷間圧延鋼板 (SPCC)	0.75	4.1	14700	180
高張力鋼板 (AFPC45)	0.65	5.9	12740	156
高張力アルミ板 (7NO1)	1.5	10.3	10950	127
カーボン FRP (CFRP)	3	16.4	15000	71.0

また、他の材料を使った場合の値は表 4.9 に示す。 m_t は共通部分の重量 m_c 、荷重 m_l 及び m_f 、 m_m 、 m_b の和であり、 m_f は、

$$m_f = K_f(m_f + m_c + m_m + m_b + m_l) \quad (4.5)$$

で求められる。あるいは式(4.5)を変形して、

$$m_f = (K_f / 1 - K_f)(m_c + m_m + m_b + m_l) \quad (4.6)$$

となる。

式(4.6)ではボディ・フレーム重量が総重量に比例するものとした。電気自動車では、重量のかなりを占める電池を設置する場所は比較的自由であり、ボディ・フレームに重量的な負担を少なくするような配置が可能である。したがって、エンジン自動車に比べて、より軽量なボディ・フレームでも安全性の点で問題がない。だが、この章の後半で行う計算では余裕を見て式(4.6)

表 4.9 各新素材を用いたボディ・フレームに対する K_f の値

ボディ・フレーム材料	K_f
冷間圧延鋼板	0.182
高張力鋼板	0.158
高張力アルミ板	0.129
カーボン FRP	0.072

に基づく重量のボディ・フレームを使用するものとする。

以上の重量の計算をまとめ、しかも、ボディの材質をアルミニウムとした場合の、積載する電池重量に対する、ボディ・フレーム重量と、総重量の値を表 4.10 に示す。なお、ここでは、モーターの重量を 60 kg, コントローラーの重量を 40 kg とし、定員は 4 名, その重量は 220 kg としてある。同表より、軽量化を図った電気自動車では、電池重量が 400 kg としても、従来のガソリン自動車と比較して、総重量の違いが 72 kg, 割合にして、わずか 6.8% である。

表 4.10 軽量化された電気自動車の電池重量に対する
ボディ・フレームの重量と総重量

電池重量	ボディ・フレーム重量	総重量
200	111	829
300	127	944
400	142	1060
500	158	1175
600	174	1290
700	189	1406

(単位 kg)

4.2.4 空気抵抗

空気抵抗 F_a の大きさは次式で与えられる^{2,9)}。

$$F_a = SC_a v^2 / 16 \quad (4.7)$$

ここで、 S は前面投影面積、 C_a は空気抵抗係数、 v は秒速である。このうち、技術の向上により小さくできるのは C_a の値である。数年前までは、乗用車の C_a の値は 0.4~0.5 程度の値であった。車の省エネ化が叫ばれるようになり、 C_a の値は最近急速に下がってきている。現在、市販の乗用車で最低の値を持つものはアウディー社から発売されており、 C_a の値が 0.28 である。また、1985 年の東京モーターショーに発表されたプロトタイプ乗用車ではフォード社が出品したプローブ V が 0.138 という値を記録している。表 4.11 に各種エンジン自動車の C_a の値をま

表 4.11 各種エンジン自動車の C_d の値

	C_d 値
従来乗用車	0.4~0.5
最近乗用車	0.28
プロトタイプ乗用車	0.15
従来トラック	0.8~1.0
プロトタイプトラック	0.32

とめて示す。

電気自動車では、エンジン自動車では必須だったエンジン冷却のための空気取り入れ口が必要でないこと、ドライブ形式や電池の配置によっては、ボンネット内部がほとんど空き、この部分のデザインが自由になること、床下の構造が単純化することなどのため、本質的に C_d が下げられる要素がある。したがって、 $C_d=0.28$ の市販車に多少の手を加えるのみで $C_d=0.2$ を得るのは困難ではない。

4.2.5 電動機

電動機は通常、磁場を発生させるための磁極と、この磁場の中で電流を流し、磁極との間にトルクを発生させるための電機子とから成っている。これらの磁極と電機子のうち、どちらかが回転し、一方が固定された状態に保たれるが、それぞれ回転子及び固定子と呼ばれる。また、電動機を回転させるためには、電機子の回転に従って、電機子に流す電流の方向を変えるための、ブラシあるいは、交流電流発生装置を必要とする。

電動機には数多くの種類があり、その分類法も数多い。電動機に印加される電流が直流か交流かによる分類が一つある。磁極の方式としては永久磁石、巻線及びリラクタンス(磁気抵抗)¹⁰⁾の各方式がある。さらに永久磁石あるいはリラクタンス型の交流電動機では、回転子の回転速度を交流の周波数に同期させる方式や、回転子の位置を検出機で検出しながら、電流の流れる方向を変化させる方式があり、それぞれ同期式、及びブラシレス DC 方式と呼ばれている¹¹⁾。また、同心円状に形成される回転子と固定子の関係において、回転子が、固定子に対して、それぞれ内側及び外側に形成されているものを、インナーローター及びアウトローター方式と呼ぶ。

これらの分類のうち、交流方式と直流方式を比較すると、直流方式にはブラシが不可欠であり、そのため電動機の構造が複雑になり、メンテナンスの必要があり、かつブラシでの損失が存在するなどの問題点がある。一方、交流方式では、回転に応じた交流電流発生装置が必要となり、そのための電子回路が必要となるという問題点がある。しかし、この後者の問題は最近のパワーエレクトロニクス発展により、次第に低下している。

磁極の方式を比較する。従来のフェライト磁石と、巻線方式を比較すると、出力が数 100 W 程度以上の場合には、巻線方式が軽量化できる。しかし、約 10 年前に発明され、最近では低価格化が進んでいる希土類磁石を用いると¹²⁾、数十 kW までは、磁石方式の方が小型化できる。最近、注目されだしたのが、リラクタンス方式である¹⁰⁾。この方式では、約 100 W を越えると巻線式よりも軽量化できると言われており、材料にも高価なものを利用する必要がないという大きな利点がある。したがって、数 kW の出力を必要とする、電動車両用の電動機の磁極の方式としては希土類磁石方式か、リラクタンス方式かのいずれかの選択になる。

交流方式における同期式と、ブラシレス DC 方式の比較では、同期式はコントローラーの構造が簡単になるという利点があるが、ブラシレス DC 方式では効率が高いという利点がある。

同期式における効率の改善のため、ベクトル制御等の新しい制御方法が考案されているが、この方式では、ブラシレス DC 方式に比べて、はるかに制御が複雑となる。これより電気自動車という目的に限れば、交流方式においては、ブラシレス DC 方式を採用することに利がある。

以上をまとめてみると、電気自動車用電動機としては、希土類永久磁石、あるいはリラクタンス方式のブラシレス DC 方式が最良と言える。

以下、DC 方式電動機の理論的取扱いに触れる。

直流機の電圧とトルクの計算方式は以下で表される。まず、端子電圧と誘導起電圧の関係は¹³⁾、

$$E = V - I_a R + e_b \quad (4.8)$$

で表される。ここで、 E は実効誘導起電力、 V は端子電圧 (単位: V)、 I_a は電機子電流 (A)、 R は電機子回路全抵抗 (Ω)、 e_b はブラシにおける電圧降下である。

電動機の形式をブラシレス DC 方式とすると、式(4.8)における e_b は消去され、

$$E = V - I_a R \quad (4.9)$$

となる。また、 E と回転数の関係は次式で与えられる。

$$E = \frac{pZ}{a} (\phi - \phi_a) n \quad (4.10)$$

ここで、 p は極対数、 Z は電機子導体数、 a は電機子回路数、 ϕ はブラシが中性点にあり、電機子電流が 0 の時の 1 極当たりの磁束 (単位: Wb)、 ϕ_a は電機子反作用と整流曲線の直線整流からのずれによる 1 極当たりの減磁磁束、 n は回転数 (r. p. s.) である。

さらに、トルクと電流の関係は、

$$T = \frac{pZ}{2a\pi} (\phi - \phi_a) I_a \quad (4.11)$$

である。

(4.10), (4.11)式より, トルクと回転数の関係を求めると,

$$T = \frac{pz\phi_e}{2a\pi R} \left(V - \frac{pz\phi_e n}{a} \right) \quad (4.12)$$

ここで, $\phi_e = \phi - \phi_a$ において, 有効磁束と名付けることにする。

式(4.12)より, トルクは回転数が0の時最大値となり,

$$T_{\max} = \frac{pz\phi_e V}{2a\pi R} \quad (4.13)$$

で与えられる。ただし, 電動機に流すことができる電流の最大値 I_{\max} がコントローラーあるいは電池により制限されるため, トルクと最大値は一般に式(4.13)より小さく, 式(4.11)に I_{\max} を代入して,

$$T_{\max} = \frac{pz}{2a\pi} \phi_e I_{\max} \quad (4.14)$$

で決定される。なお, 式(4.13), (4.14)のトルクの単位は $\text{N} \cdot \text{m}$ である。また, 回転数はトルクが0の時最大で,

$$N_{\max} = \frac{aV}{pz\phi_e} \quad (4.15)$$

となる。

次に, 電動機の出力は, I_{\max} で制限される領域では, 式(4.14)に回転数と 2π をかけ,

$$P = \frac{pz\phi_e n I_{\max}}{a} \quad (4.16)$$

で与えられ, 回転数に比例する。制限からはずれる領域では式(4.12)に回転数と 2π をかけて,

$$P = -\frac{(pz\phi_e)^2}{a} \left(n - \frac{aV}{2pz\phi_e} \right)^2 + \frac{V^2}{4R} \quad (4.17)$$

となる。式(4.17)より, 最大出力は,

$$P_{\max} = \frac{V^2}{4R} \quad (4.18)$$

で与えられる。

電気自動車用電動機として最も重要な要素の一つは効率であるが, 効率 η_m は,

$$\eta_m = \frac{P}{IV} \quad (4.19)$$

で表される。式(4.19)に式(4.9), (4.10), (4.11), (4.17)を代入して,

$$\eta_m = \frac{1}{1 + \frac{2\pi TC_m}{n}} \quad (4.20)$$

が得られる。ここで C_m は電動機に特有の定数で,

$$C_m = \left(\frac{a}{p z \phi_e} \right)^2 R \quad (4.21)$$

で定義される。式(4.20)より、 C_m の値が小さい程、電動機の効率は向上する。それには、強力な磁石を使い、 ϕ_e の値を大きくすること、巻線数、極数を増やすこと、太い巻線を使い、抵抗を小さくすることなどが有効である。式(4.20)より明らかなように、 η_m は回転数と必要なトルクとの関数でもある。通常の電動機では、過渡状態の効率が問題にならない場合が多いが、電気自動車は発進、停止を繰り返し、しかも、かなりの加速度の良さが要求される。すなわち、式(4.20)において、 T が大きく、 n が小さいという条件で、車が発進することになるわけであるから、 C_m の値を小さくすることが、電気自動車用の電動機としては特に重要であるといえる。

ブラシレスDC方式の電動機では通電の方式により、その特性に大きな違いが生じる。電動機の形状として、図4.4に示すように、磁界を形成する磁石が、電機子巻線の外側に配置され、かつ、この磁石がローターとして作動する、アウトローター式の3相電動機を仮定する。電機子の各線の端には例えばホール素子などの位置センサーが取り付けられている。この位置センサーはローターの回転に基づいて磁石のN極とS極とを検知して、ON-OFFを繰り返す。図4.5Aに、これらのセンサーの出力信号の形状を示す。センサーが電機子巻線1相当なりに1個ずつ取り付けられるため、センサーの出力は都合3個となる。これらのセンサーの出力はローターの回転が90°ごとにONあるいはOFFとなり、かつ、3個のセンサーの出力は互いに60°ずつの遅れをもっている。これらのセンサーの出力に対応して、巻線に電流を流すことにより電動機が回転する。この場合、各巻線に正方向のみの電流を流す場合を半波通電、正、逆両方向の電流を流す場合を全波通電と呼ぶ。また、ローターが60°回転するごとに通電を切り換える方式を60°通電、90°ごとに切り換える方式を90°通電と呼ぶ。各通電方式における各巻線に対する通電のタイミングチャートを図4.5のB~Eを示す。D、Eの方式で電圧が±Vと記されているのは、それぞれ正方向及び逆方向に電流が流されることを示している。

これらの通電方式の違いにより、電動機の実効的な巻線数と抵抗が変化する。半波60°通電時

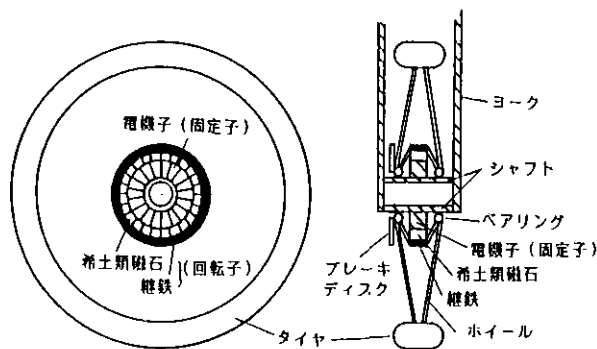


図4.4 アウトローター式3相ブラシレスDC電動機の構成図

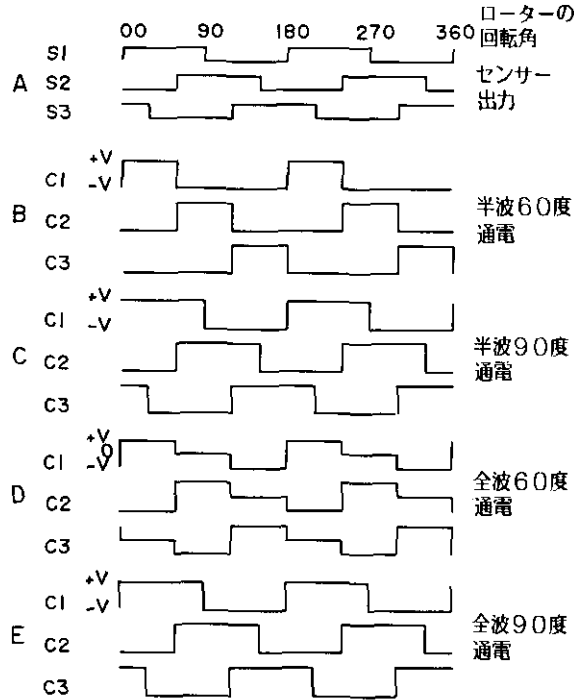


図 4.5 3相ブラシレス DC 電動機の各相のセンサー出力と各相への通電波形

の巻線数と抵抗を基準とすると、他の三つの通電方式における巻線数と抵抗値は表 4.12 に示す通りとなる。これらの値の変化により、同一の印加電圧とした時のトルク及び回転数の最大値、さらに、式(4.21)の定数も表 4.12 に示したように変化する。表 4.12 より、最大の回転数は半波 60°通電方式で実現されるが、 C_m の値が最も小さく、効率が低い。また、全波 90°通電方式では、これと逆の特性となる。したがって、低速時には全波 90°通電で走行し、速度が高くなるに従って全波 60°、半波 90°、半波 60°の各通電方式に切り替えることにより、効率がよく、かつ速度のダイナミックレンジの広い走行が可能となる。

表 4.12 ブラシレス DC 電動機への通電方式の違いによる特性の変化

通電法式	巻線数 (z)	抵抗値 (R)	最大トルク (T_{max})	最高回転数 N_{max}	電動機定数 C_m
半波60°	1	1	1	1	1
半波90°	1.5	1.5	1	1/1.5	1/1.5
全波60°	2	2	1	1/2	1/2
全波90°	3	3	1	1/3	1/3

表 4.13 に、サマリウム-コバルト希土類磁石を使用する場合の 3 相ブラシレス DC 電動機の仕様の一例を示す。この電動機のトルク-回転数特性を図 4.6 に示す。ここで、印加電圧は 48 V としてある。

表 4.13 サマリウム-コバルト希土類磁石を使用した 3 相ブラシレス DC 電動機の仕様の一例

パラメータ	仕 様
形 式	アウトローター式
相 数	3相
磁極数	24極
磁石の外径	200mm
磁石の内径	184mm
磁石の高さ	47mm
表面磁束密度	6.7KG
電機子巻線数	25巻
巻線直径	1.9mm
巻線抵抗	0.29Ω
電動機定数	14.2

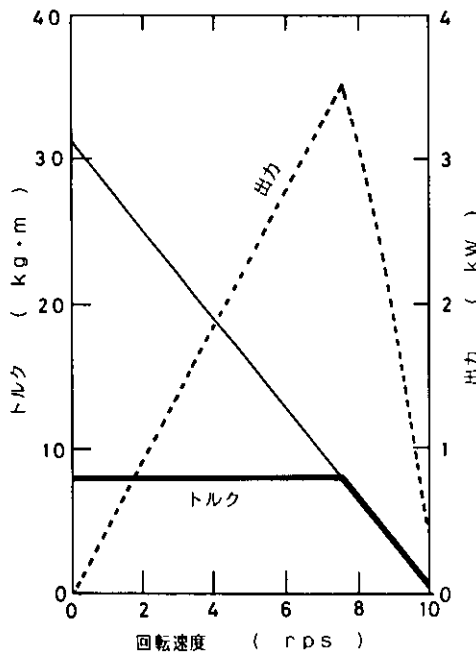
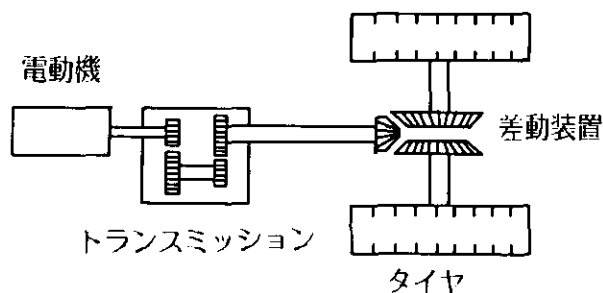


図 4.6 サマリウム-コバルト希土類磁石の使用した 3 相ブラシレス DC 電動機の特特性図

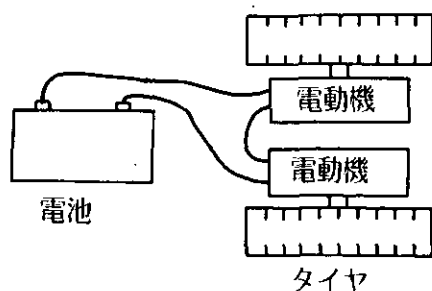
4.2.6 伝達機構

エンジン自動車では、トランスミッションや差動装置などの伝達系は必須の構成要素である。従来の電気自動車では、これらの伝達系にはエンジン自動車のものがそのまま使われるケースがほとんどであり図4.7(a)のような構成となっていた。伝達系はそれ自身が損失を生むと同時に回転部分相当重量を増やし、結果的にはブレーキ損失を増加させるという作用がある。例えば、4段変速の場合、ロー、セカンド、サード、トップの各変速段に対する回転部分相当重量はエンジン自動車の場合、それぞれ総重量の70%、54%、20%及び10%程度であった。電動機の慣性モーメントはエンジンに比べて多少大きく、したがって、電気自動車の回転部分相当重量はエンジン自動車のそれよりもいくぶん大きくなる。

電気自動車では電動機の特性を巧みに利用すれば、車輪に電動機を直結したダイレクトドライブも可能である。すなわち、図4.7(b)に示すように2個の電動機を左右の車輪に直結するか、あるいは埋め込むかしたうえで、電池に対して、これらの電動機を直列につなぐ。このような構成にすると車が旋回する際に内側に荷重がかかり、内側の車輪の回転数が低下することにより、この電動機の起電力が低下する。それに伴い外側の電動機に印加される電圧が上昇し、回転数が上昇する。このような働きはエンジン自動車における差動装置の働きと全く等しい。



(a)



(b)

図4.7 各種の伝達機構の構成

この方式は、前章で述べたように、ホイールモータの名で大ブローの時に採用されたことがあった¹⁹⁾。しかし、当時は電動機の出力当たりの重量が3 kg~5 kg/kW とかなり重く、軽い重量で電気自動車を低速から高速まで効率よく動かすには電動機と車輪との間に自動変速機を入れる必要があった。このため機構が複雑になることはもちろんのこと、左右両輪の回転バランスをとることも難しく、したがって実用的な技術として使用することができなかつた。ところが、最近、希土類磁石の実用化に伴って電動機の出力当たりの重量が1 kg/kW 程度にまで下げられ、しかも、低速回転でのトルクを大きくとることが可能になった。この技術を使えばダイレクトドライブが実用的に使えるようになる。

4.2.7 コントローラー

電動機の手速度あるいはトルクを制御するには電動機と電池の間にコントローラーを挿入する必要がある。電動機の型式が直流方式の場合には、電池から電動機に流す電流を高速度でスイッチングを行うことにより、制御が可能である。交流方式の場合には、直流機におけるブラシの役割を果たすため、各相に通電するタイミングも制御する必要がある。

コントローラーは電動機に流す電流あるいは電圧波形を形成するための演算回路と、この波形を電動機に伝えるためのパワースイッチ素子とから成っている。4.2.5 で述べた3相ブラシレスDC方式を用いる場合のコントローラーの演算回路の一例を図4.8に示す。同図の回路では、90°と60°の通電の変換、全波と半波の通電の変換、正・逆転の変換、アクセルの踏み込みに依存して、電動機への平均の印加電圧を変えるための、キャリアパルス幅設定を行うことができる。

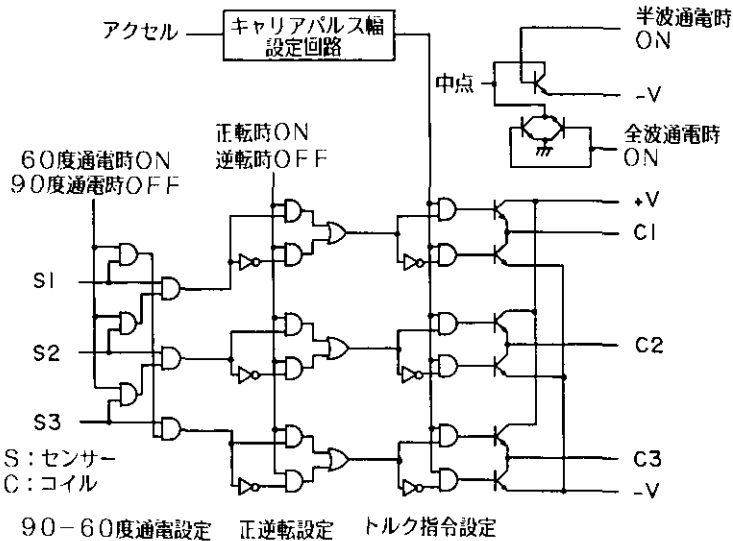


図4.8 3相ブラシレスDC電動機のコントローラーの演算回路の一例

コントローラーの性能はパワースイッチング素子に大きく依存している。従来はパワー素子として、サイリスタ又はパワートランジスタが使われてきた。しかし、これらの素子は高速スイッチングができないというのが一つの大きな欠点であった。このため、

- (1) スイッチングの過渡状態での損失が大きいこと、
- (2) スイッチングの周波数が可聴周波数以上にできないため、耳ざわりな雑音が発生すること、
- (3) 電動機に供給する電力を一定値に近づけるため、パワースイッチング素子と電動機の間リアクトルを挿入して平滑化を図る必要のあることなどの問題があった。特に、(2)の問題は、これまでのコントローラーの最大の欠点とされていた。さらにもう一つの欠点として、ドライブ回路が複雑にならざるを得ないということもあった。

これらの問題点を解決するため、最近、新しいパワースイッチング素子が開発され始めている。それらの特性を表 4.14 に示す^{15,16)}。同表において、パワー-MOS-FET は 200 V 程度までの印加電圧において、スイッチング速度を決める遮断周波数や、効率に影響を与える ON 抵抗について良い特性を持っている。ただし、1 個で大電流が流せる素子の開発はまだ進んでおらず、電気自動車に用いる場合には、素子を並列に使用する必要がある。200 V 以上、1000 V 程度までの間で使用可能な素子として、バイポーラー-MOS-FET がある。これは MOS-FET に比べて、遮断周波数は低い、それでも可聴周波数を越えているため、サイリスタやパワートランジスタのような問題点はない。また、現在のところ、大電流が流せる素子が開発されていない点では MOS-FET と同じである。1000 V 以上の印加電圧では GTO(ゲートターンオンサイリスタ) と SIT(静電誘導トランジスタ) が使用可能である。電動車両においては 1000 V 以上の印加電圧で電動機を使用することは感電などの安全性の面で問題があるため、電動車両用のパワースイッチング素子としては将来的にはパワー-MOS-FET あるいはバイポーラー-MOS-FET が主流になるものと考えられる。

従来のサイリスタを用いたコントローラーの場合、効率は 92~93%程度と言われているが、パワー-MOS-FET を使用する場合、95%程度にまで向上させる見込みである。

表 4.14 パワースイッチング用半導体素子の特性比較

	パワー MOS-FET	バイポーラー MOS-FET	GTO	SIT
耐電圧(V)	~200	~1200	~4500	~1500
耐電流(A)	~ 40	~ 75	~2500	~ 100
遮断周波数(MHz)	~100	~ 0.6	~ 0.1	~ 7
オン抵抗(Ω)	0.04	0.15	—	0.5

4.2.8 ブレーキ損失

車の加速や登坂時に得られた運動エネルギーや位置エネルギーは減速時に、ブレーキで消費される。エンジン自動車ではこの損失を積極的になくすことはできないが、電気自動車では電動機に回生装置を付けることにより、電気エネルギーとして回収できる¹⁷⁾。回収の効率 η_r は電動機の回生効率を η_m 、電池への充電効率を η_c とすると、

$$\eta_r = \eta_m \cdot \eta_c \quad (4.22)$$

で与えられる。一般に η_m の値は60%程度、鉛電池の場合 η_c は90%程度である。

4.3 電気自動車の性能計算の基本式

エンジン自動車は、エンジンの性能、特に過渡的な性能を定量化することが難しいため、その走行性能を定量化することは誤差を生みやすい。ところが電動機の性能は、4.2.5で示した通り定量的に扱うことができる。このため、電気自動車の性能を比較的高い精度でシミュレートすることは可能である。ここでは、電気自動車の性能で最も問題にされる一充電走行距離、エンジン自動車に比較して劣っている項目である最高速度と加速度、及び実用的な使用の際に重要であるエネルギー消費率と経済性の各項目を計算するための基本式を導出する。

4.3.1 レンジ（一充電走行距離）

レンジは定速走行、パターン走行のそれぞれで定義される。日本ではパターン走行については4モード、6モード、10モード、11モードあるいは実走行モードなどの走行パターンが使用されているが、電気自動車の性能の評価には4モードが使用されることが多く、エンジン自動車では10モードが多い。図4.9に4モード走行パターンを示す。

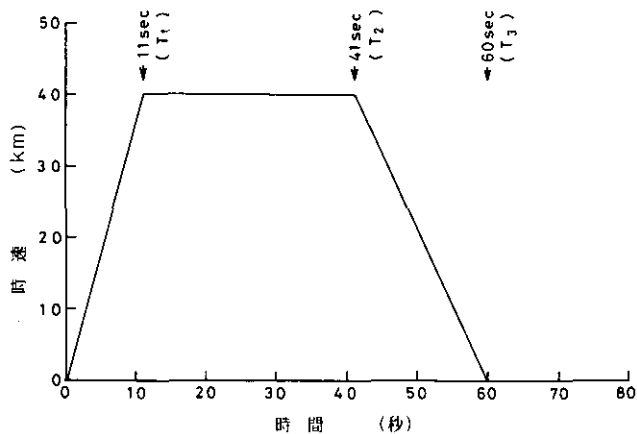


図4.9 4モード走行パターン

レンジの計算は以下の手続きで行う。

1) 定速走行

定速走行時の走行抵抗 F_{Rc} は転がり摩擦抵抗 F_r と空気抵抗 F_a との和として、

$$F_{Rc} = F_r + F_a \quad (4.23)$$

で表される。車が v の秒速で走行しているものとする、その時必要なパワーは、

$$P_c = F_{Rc} v \eta_{mc} \eta_T \quad (4.24)$$

ここで η_{mc} はモーターとコントローラーを含めた効率、 η_T は伝達機構の効率である。

電池に蓄えられている電力は、電池重量 m_b と電池のエネルギー密度 E_b の積で次式で表される。

$$E_B = m_b E_b \quad (4.25)$$

式(4.25)を式(4.24)で割ると走行可能な時間 T_c が求められる。

$$T_c = \frac{E_B}{P_c} \quad (4.26)$$

レンジ L_c は T_c に時速 V_H をかけることにより求められる。

$$L_c = T_c V_H \quad (4.27)$$

2) パターン走行

パターン走行時の走行抵抗は、定速走行時には式(4.23)と同一であり、加速時には加速抵抗 F_A が加わり、

$$F_{RA} = F_r + F_a + F_A \quad (4.28)$$

となり、さらにこの時に必要なパワーは、

$$P_A = F_{RA} V \eta_{mc} \eta_T \quad (4.29)$$

で表される。なお、加速抵抗 F_A は、

$$F_A = (m_t + m_r) a_A \quad (4.30)$$

である。ここで m_t は総重量、 m_r は回転部分相当重量、 a_A は加速度である。

減速時には再生ブレーキを用いるとすると、走行抵抗は、

$$F_{RA} = F_r + F_a - F_D \quad (4.31)$$

となる。ここで、 F_D は回生ブレーキによる減速の抵抗であり、

$$F_D = (m_t + m_r) a_D \quad (4.32)$$

である。ここで a_D は減速度を示す。ブレーキで回収できるパワーは、

$$P_R = (-F_{RA}) V \eta_{mc} \eta_T \eta_c \quad (4.33)$$

である。ここで η_c は電池の充電効率である。パターン走行1サイクル当たりに必要な走行エネルギーは電池の内部損失が無視できる場合には、

$$E_c = \int_A P_A dt + \int_C P_c dt - \int_D P_R dt \quad (4.34)$$

で記述できる。ここで、式(4.34)の積分範囲を示すA, C, Dはそれぞれ、加速時、定速時及び減速時を示す。

E_B を E_c で割ることにより、一充電で走行できるパターンの回数が求められる。

$$N_p = \frac{E_B}{E_c} \quad (4.35)$$

さらに、これに1パターン当たりの走行距離 I_p をかけてレンジが求められる。

$$L_p = I_p \cdot N_p \quad (4.36)$$

電池の内部損失が無視できない場合には以下の手続きを加える必要がある。まず、式(4.33)から回生ブレーキに関する項を取り去り、

$$E_{cND} = \int_A P_A dt + \int_C P_c dt \quad (4.37)$$

を計算する。式(4.35)の E_c の代わりに E_{cND} を用い、 $N_{PNC} = E_B / E_{cND}$ を求める。1パターン当たりの走行時間を t_p とするとき、 N_{PNC} 回のパターン走行で走行できる時間は、

$$T_p = N_{PNC} t_p \quad (4.38)$$

である。 T_p の逆数 $C_r (= 1/T_p)$ が電池のエネルギー消費時間率となる。 C_r を、電池の有効エネルギー密度 E_{be} を求める式(4.1)に代入し、 E_{be} を求める。そして、式(4.36)のレンジに、放電率が0.2C以下の時の電池のエネルギー密度 E_b と E_{be} との比をかけると、電池の内部損失がある場合のレンジとなり、次式で表される。

$$L_{pl} = L_p (E_{be} / E_b) \quad (4.39)$$

なお、これまでの議論で明らかであるが、電池の内部損失がある場合と、ない場合の判定は式(4.38)で求められた T_p が5時間以上の場合には損失なし、それ以下の時は損失ありとなる。

4.3.2 最高速度

電気自動車の最高速度を決める要因は、電動機の最大回転数と、電池のパワーのいずれかである。電動機の最大回転数で決まる場合には、式(4.14)に車輪の直径と π をかけた値で決まる。電池のパワーによる場合には、電池が出せるパワーに、電動機、コントローラー及び伝達の効率をかけた値が車の走行に必要なパワーに一致する時の速度となる。すなわち、

$$\begin{aligned} P_b m_b \eta_{m.c} \eta_T &= (F_r + F_a) v g \\ &= \left(\mu m_t + \frac{S C_a v^2}{16} \right) v g \end{aligned} \quad (4.40)$$

の等式が成立する時の v の値が最高速度である。ここで、 g は重力加速度である。式(4.40)は v の3次式であるが、高速では右辺の第1項が第2項に比べて十分に小さい。このような条件が満たされる時には最高速度は近似的に、

$$v_{\max} \approx \sqrt{\frac{16 p_b m_b \eta_T}{S C_a g}} \quad (4.41)$$

で表される。

一般に、電動機の最大回転数は印加電圧や電動機の巻線数の変更等で比較的容易に変えられる。したがって、最高速度は電池のパワーにより制限されることがほとんどである。

4.3.3 加速性能

車の加速の良さは、スタートしてから定められた速度に達するまでに要する時間、あるいは定められた距離を走行するのに要する時間で評価される。電気自動車では前者が用いられることが多く、特に、スタートから50 km/hに達するまでの時間が使用される。これを0~50 km/h加速と呼ぶことにする。エンジン自動車では、もっぱら後者の0 mから400 m間での走行時間が使われる。これは、1/4マイル加速と呼ばれることが多い。

電気自動車において、電池と電動機及びコントローラー、さらに伝達装置から成る駆動系により得られる駆動力から、定速走行状態における走行抵抗を引いたものを余裕駆動力と呼ぶことにする。余裕駆動力を、総重量に回転部分相当重量をたした値で割ったものが、電気自動車の加速度になり、次式で表される。

$$a(v) = \frac{F_d - F_r}{m_t + m_r} \quad (4.42)$$

ここで、 F_d は電気自動車の駆動力である。

F_d は、電動機と電池特性の関係から、2通りの要因で決定される。一つは、低速の場合で、電動機に流される電流がコントローラーにより制限される場合である。この場合には、電動機から取り出せるトルクは式(4.11)で与えられ、 F_d はこれを車輪の半径 r で割り、しかも伝達系の効率をかけて、

$$F_a = \frac{K_m I_a \eta_T}{2\pi r} \quad (4.43)$$

となる。ここで K_m は電動機に特有の定数で、式(4.21)を変形して、

$$K_m = \frac{pZ\phi_e}{a} \quad (4.44)$$

で定義される。なお、各パラメーターの意味は4.2.5に示したものと同一である。以下、この K_m の値を電動機定数と呼ぶことにする。

ある程度以上の高速では、 F_a は電池の出力及び電動機、コントローラー、伝達装置の効率から求められる。

電池のパワー密度を P_D とする時、電池の出力は、

$$P_B = m_B P_D \quad (4.45)$$

である。また、電動機への印加電圧、印加電流及びコントローラーの効率 η_c の間には、

$$P_B = \frac{v I_a}{\eta_c} \quad (4.46)$$

の関係がある。式(4.46)と、式(4.8)、(4.9)、(4.10)から v と I_a を消去すると、電動機から取り出せるトルクは、

$$T_m = \frac{K_m P_B \eta_c}{2\pi} \cdot \frac{2}{K_m \eta + \sqrt{K_m^2 \eta^2 + 4PR\eta_c}} \quad (4.47)$$

となる。

式(4.47)に伝達装置の効率をかけ、トルクを駆動力に変換し、電動機の回転数を車の速度に換算すると F_a が求められる。

$$\begin{aligned} F_a &= T_m \eta_T / r \\ &= \frac{K_m P_B \eta_c \eta_T}{2\pi r} \cdot \frac{2}{\frac{v K_m}{2\pi r} + \sqrt{K_m^2 \left(\frac{v}{2\pi r}\right)^2 + 4PR\eta_c}} \end{aligned} \quad (4.48)$$

式(4.48)を時間について積分することにより、スタートから一定時間後の速度が求められ、さらにもう1度積分することにより、走行距離が求められる。

4.3.4 エネルギー使用率・経済性

車の経済性の評価要素は多い。ここでは、原油を一次エネルギーとした場合、単位距離走行するのに要するエネルギー消費量を経済性の一つの目安にする。現実には、単位走行距離当たりの必要経費がどの程度であるかも判断の基準となる。

1) エネルギー消費量

原油をそのまま発電所で燃やし、発電を行い、送電し、鉛電池に充電する場合、それぞれの過程でのエネルギー効率には表 4.15 に示す通りである。ここで、発電、送電の効率は、日本の昭和 53 年度の平均値である¹⁸⁾。表 4.15 より電気自動車では、電池エネルギーが蓄えられるまでに 75% が損失となる。こうした蓄えられた電力で定速走行の場合約 80%、発進加速時約 70% の効率で電動機を回転させる¹⁹⁾。したがって、総合的な効率は定速走行 20%、発進加速時 17.5% 程になる。

表 4.15 電気自動車とガソリンエンジン自動車のエネルギー効率の比較

電気自動車		(%)	
	定地走行時	加 速 時	
発 電 効 率		38.17	
送 電 効 率		93.9	
充 電 効 率		70	
電 動 機 効 率	80	70	
総 合 効 率	20	17.5	
エンジン自動車			
	定地走行時	加 速 時	
精 製 効 率		91.6	
エ ン ジ ン 効 率	15	11	
総 合 効 率	13.7	10	

ガソリン自動車では、発電、送電、充電の損失に相当するのが原油からガソリンへの精製効率で、日本の平均が 91.6% である。また、ガソリン自動車の定速走行時の効率は 15% 程度、発進加速時には 11% 程度であるから、総合効率は定速走行と発進加速のそれぞれで、約 13.7% 及び 10.1% になる。さらに、ディーゼルエンジン自動車では、ガソリン自動車に比べて約 1.5 倍効率が良好である。一般に、エンジン自動車に比べて電気自動車は効率が悪いと考えられているが、電動機とエンジンの効率が大幅に違うため、電気自動車の総合的効率は、ガソリン自動車に比べればかなり良好で、ディーゼルエンジン車とはほぼ等しい。

電気自動車の一次エネルギー使用量は、

$$E_1 = \frac{e_a m_b}{L \eta_g \eta_t \eta_c} \quad (4.49)$$

で求められる。ここで、 η は効率で、添字の g , t , c はそれぞれ発電、送電、充電を意味する。

また、その他の定数の意味は既に示した通りである。

2) 走行費用

走行費用の算出に当たっては、単位距離走行当たりの車体価格に、いわゆる運行三費を加算し、さらに修理代や保守費用も考えに入れる必要がある。ここで運行三費とは、ガソリン自動車の場合、ガソリン代、オイル代、それにタイヤの償却費である。電気自動車ではこれが、電力料金、電池償却費、タイヤ償却費となる。

まず、車体価格についていえば、現行では、電気自動車がガソリン自動車に比べて2~3倍するが、これは量産の効果で比較にならない。もし、電気自動車の生産が日産3,000台になれば、エンジン自動車とほぼ同等の価格になるとの報告が日本電動車両協会から出されている²⁰⁾。さらに量産が進めば、電気自動車は構造が簡単のため、エンジン自動車よりも安価になることは容易に想像がつく。また、省エネモデルとした場合、車体価格に最も影響を与えるものは、ボディの軽量化による材料費の高騰である。この高騰は、電気自動車の量産化による価格の低下と相殺できるかどうかの判断は今の段階ではできないが、いずれにしても、それ程大きな価格差を生むことはないと考えられる。

運行三費のうち、タイヤについては共通であるから、比較の対象から外す。また、保守関係費用は、電気自動車の方が安価と見積もれるが、大きな額ではないので考慮外とする。

1 km 走行当たりの電池償却費は次式で求められる。

$$C_B = \frac{m_b C_b}{LN d_a} \quad (4.50)$$

ここで、 C_B は電池 1 kg 当たりの価格、 N は寿命、 d_a は寿命を算出する際の放電深さである。電力料金あるいはガソリン代は次式で求められる。

$$C_E = \frac{e_i m_e c_e}{L} \quad (4.51)$$

ここで、 e_i は電池あるいは燃料のエネルギー密度で、 m_e 、 c_e はそれぞれ、それらの重量と、単位当たりの料金である。

電気自動車では上記の式(4.50)と式(4.51)の和を走行費用とする。ガソリン自動車では、式(4.51)にオイル代として1 km 当たり1円を加算する。

式(4.50)、(4.51)に代入するための値を表4.16に示す。

4.4 省エネ対策を施した電気自動車の性能

前節で述べた電気自動車の性能の計算式から、実際の性能を求めるのは、解析的な手続きでは複雑すぎるので、コンピュータの助けが必要となる。ここでは、マイクロコンピュータ(NEC-9800)を用い、ベーシック言語によるプログラムを作成した。

表 4.16 維持費の計算のための各パラメータの値

	電気自動車	ガソリン自動車
電池価格	480円/kg	
電池寿命	600回	
放電深さ	0.75	
燃料価格	20円/kWh	150円/l
燃料エネルギー密度	48Wh/kg	9500kcal/l

ここで、取り上げる車種は、4人乗りの大衆クラス乗用車及び11t積の大型トラックとした。その理由は、これらの二つの車種で現在の日本の車が代表できるためである。

4.4.1 乗用車

計算に用いる乗用車のパラメータの値を既述した考察結果（4.2節）を参考にして表4.17のように設定した。

表 4.17 電気乗用車の性能計算に用いるパラメータの値

	従来の電気自動車	省エネ型電気自動車
転がり摩擦抵抗係数	0.025	0.007
空気抵抗係数	0.45	0.2
前面投影面積(m ²)	1.55	1.55
電動機効率(加速時)	0.7	下の式による
(定常走行時)	0.8	
伝達効率	0.9	1.0
回生効率	0	0.5
総重量(kg)(電池重量:400kg)	1320	1060
慣性重量(総重量に対する割合)	0.7(1ギア)	0.05
	0.54(2ギア)	
	0.2(3ギア)	
	0.1(4ギア)	
電池のエネルギー密度(Wh/kg)	48	48
電池のパワー密度(W/kg)	120(満充電)	120(満充電)
	100(中間状態)	100(中間状態)
	80(放配終期)	80(放配終期)

$$\text{電動機効率} \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{2\pi TR}{K^2 n}}$$

ここで、 η : 効率、 T : トルク、 n : 回転数、 K : 電動機定数、 R : 電動機の抵抗
 ここで考えている電動機では $K=14.17$, $R=0.29$.

省エネモデルの仮定として、タイヤの転がり摩擦係数は0.007、空気抵抗係数は0.2の値を使い、ボディ・フレームの材料には鉄の代わりにアルミニウムを使用するものとした。電動機には表4.13に示した特性のものを使用し、これを4輪すべてに1個ずつ装着するものとした。電池は現在入手可能な鉛電池を使用するものとした。コントローラーにはスイッチング素子として、MOS・FETなどの新しい素子を使うものとし、その効率は、すべての走行条件で一律95%と仮定した。回生ブレーキの効率も、すべての速度で50%とした。

計算の結果として、まず、レンジを図4.10に示す。同図は横軸に、積載する電池の重量をとってある。また、計算は40 km/h、100 km/hの定速走行と、4モード、10モードのそれぞれの走行モードについて行っている。同図から明らかなように、電池重量が増えるに従ってレンジは向上している。ただし、4モード及び10モード走行では向上の割合いが、電池重量の増加に伴い減る傾向がある。これは、軽量の電池を用いた場合、電池の平均の放電率が0.2Cをかなり越えるが、300 kg程度で0.2Cとなることが一点である。もう一点は、電池重量が増えるに従い、電池そのものを運ぶためにエネルギーが消費される割合が増えることによる。

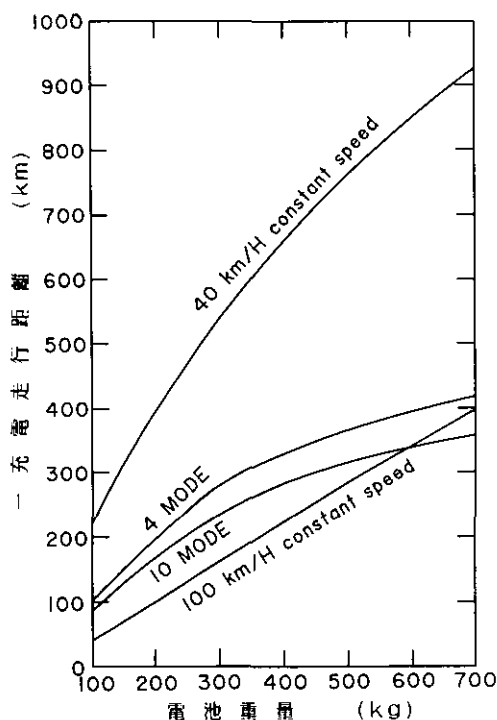


図4.10 省エネ型電気乗用車の積載電池重量に対するレンジ（一充電走行距離）

実際に電気自動車を構成する場合、これまで作られた電気自動車の電池重量が300~500 kg程度であったことも考慮すると、電池重量は400 kg程度が適当であると考えられる。もし400 kg

とする場合、レンジの値は、40 km/h の定速走行では 670 km にもなる。4 モード走行の場合のレンジは 330 km である。また、10 モードでも 280 km である。さらに高速道路を走行する場合には 220 km となる。最も過酷な使い方をするタクシーでも 1 日の走行距離が 200 km 以内と言われており、市街地を走行する場合には、ほぼどのような目的にもこの電気自動車は使用可能であると言える。また、高速道路を利用して長距離走行を行う場合については次の章で議論する。

このように、省エネモデルのレンジはこれまでの電気自動車に比べてかなり向上していると言えるが、その理由について検討する。

まず、改造モデルと比べたレンジの向上の割合を 4 モード走行について比較した結果を図 4.11 に示す。同図には双方の車種のレンジと、その比を示してある。これによると積載している電池の重量により異なるが 4 倍から 6 倍の差がある。電池重量が 400 kg の場合にはその差が 4.6 倍である。同図においては、電池重量が小さい程差が大きいのは、電池の内部損失の影響が、改造モデルで電池重量が小さい時に特に大きいことによる。

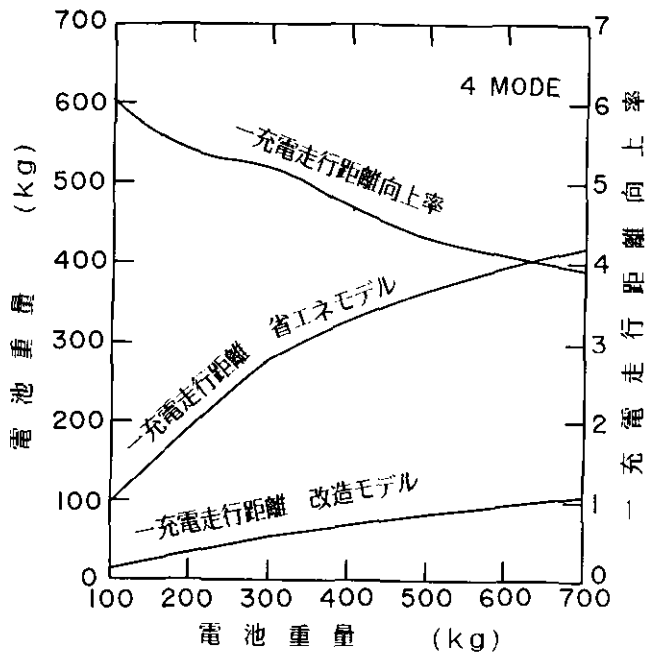


図 4.11 4 モード走行における省エネ型及び改造型電気乗用車の積載電池重量に対するレンジ（一充電走行距離）と両者の比

次に、エネルギー消費のどの過程で省エネ化が進んでいるのかを見るため、4 モード走行 1 サイクル当たりでの電力エネルギーの消費を、各過程ごとに計算した。ここで、電池重量を 400 kg とし、改造モデルと省エネモデルの双方についての比較を行った。結果を図 4.12 に示す。同

図において、省エネモデルには伝達損失が全くなくなっているのは当然として、電池の損失がなくなっていることは注目に値する。また、ブレーキ損失は、省エネモデルでむしろ増えている。これは、改造モデルでは減速時に運動エネルギーのかなりの部分がタイヤの転がり摩擦抵抗と空気抵抗で失われていたものが、省エネモデルはそれが大幅に減ったことにより、ブレーキで損失する分が増えたということである。

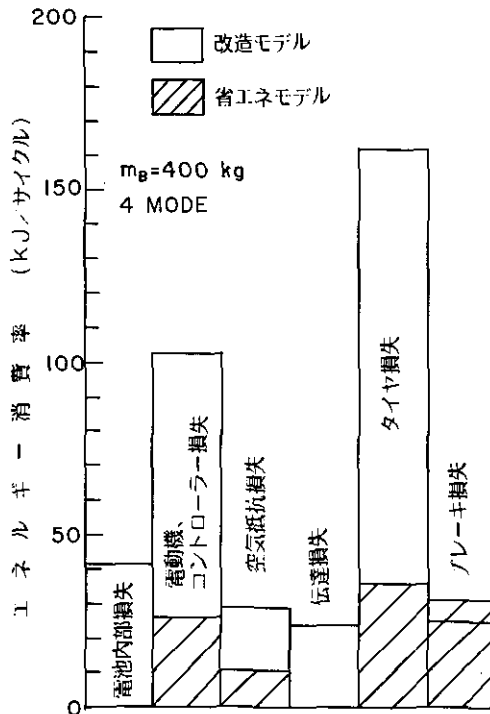


図 4.12 4モード走行における省エネ型及び改造型電気乗用車のエネルギー消費の過程ごとのエネルギー消費量

では、何故、省エネモデルでは改造モデルに比べて、図 4.11 で示したように、大きなレンジの向上が見られるのかについて検討する。まず、その理由の一つは、エネルギーを消費している主な部分のすべてでかなり損失が減っていることにある。第2の理由は重要な点であるが、次のように説明される。図 4.13 は電池重量 400 kg で 4 モード走行の場合の、各省エネルギー対策ごとのレンジの向上率を示している。ここで、斜線部は改造モデルに、各省エネルギー対策を1種類のみ施した場合である。白ぬきの部分は他の省エネ対策をすべて施した上で、1種類のみ付け加えた時の結果である。斜線の部分について、すべての対策にわたって掛け合わせると、3.2倍という値になる。しかし、実際にはレンジ向上の割合は4.6倍である。この差は、それぞれの対策を施したことによる相乗効果によるものということが言える。例えば、回生ブレーキの場合、改造モデルに回生ブレーキのみを加えた時のレンジの向上は1.05倍であるが、他の対策を施し

た上、回生ブレーキを付け加えると、1.25 倍のレンジ向上となる。その理由は、タイヤの転がり摩擦が減り、空気抵抗が減った状態では、減速の際に回生ブレーキで回収できる運動エネルギーの量がより大きくなるためである。

このように、省エネ対策を施すことにより、予想以上にレンジが向上するというのがここでの検討で最も注目すべき点である。

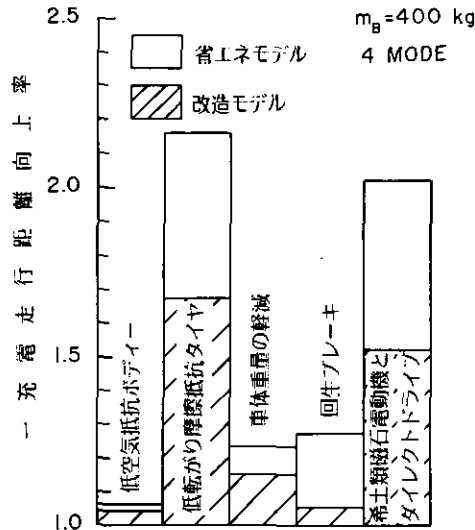


図 4.13 省エネ型電気乗用車の 4 モード走行における各省エネルギー対策技術ごとのレンジ（一充電走行距離）の向上率

省エネモデルのその他の性能について述べる。図 4.14 は最高速度の計算結果である。これによると、400 kg の重量の電池を用いると、改造モデルの最高速度は満充電時、すなわち、電池のパワー密度が 120 W/kg の時でも時速 120 km/h に過ぎないが、省エネモデルでは、電池に電力がほとんど残っていない状態、すなわち、パワー密度が 80 W/kg の時でも約 180 km/h にまで達する。このように大きな差がでる最大の理由は C_d の違いによる。最高速度のこの値は実用的には十分すぎる程である。加速性能についても同様の計算を行った。ここでは 0~400 m 加速と、スタートから 50 km/h 時に達するまでの時間を計算したが、それぞれの結果を図 4.15 及び、図 4.16 に示す。図 4.15 によると、電池重量 400 kg で電池のパワー密度が 80 W/kg のときに、0~400 m 加速が改造モデルでは 27.7 秒もかかるのに対し、省エネモデルでは 21.5 秒となり、パワー密度が 120 W/kg の時には改造モデルでは、24 秒であるが、省エネモデルでは 19.3 秒となる。このように、加速性能が向上したことの理由は、省エネ化されて走行抵抗が減り、しかも、総重量も小さくなったことによる。なお、これまでのエンジン自動車の加速時間は大衆車

で18~20秒，ディーゼル乗用車で22秒程度であった。このことから，省エネモデルは加速の良さについても十分実用的であるということが言える。

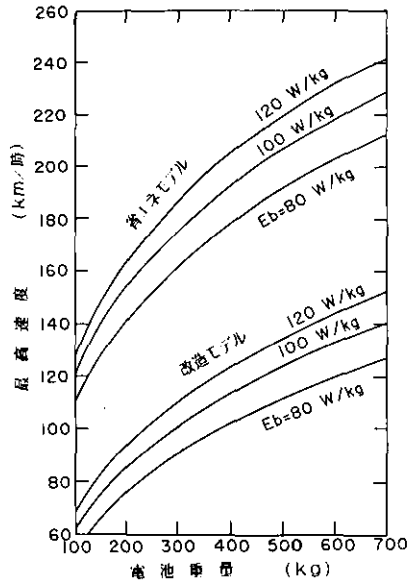


図 4.14 電気乗用車の電池重量に対する最高速度

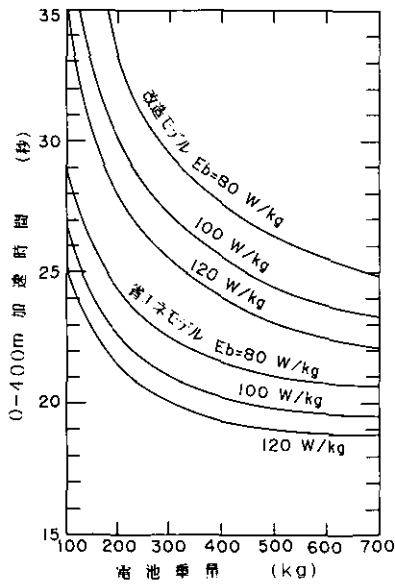


図 4.15 電気乗用車の電池重量に対する加速性能 (0 → 400 m 加速時間)

省エネモデルはもちろん、エネルギー問題の解決にも大いに貢献できる。どの程度の効果があるかを比較するため、一次エネルギーに原油を使うものとして、その消費量を計算した。図4.17に4モード走行を行った場合の結果を示す。図4.17によると、省エネモデルでは、現在のガソリン車に比べて約1/5.5の原油を消費するのみである。これは、電気自動車自体がエンジン自動車より約1.5倍効率が良いことと、省エネの効果との二つの理由による。

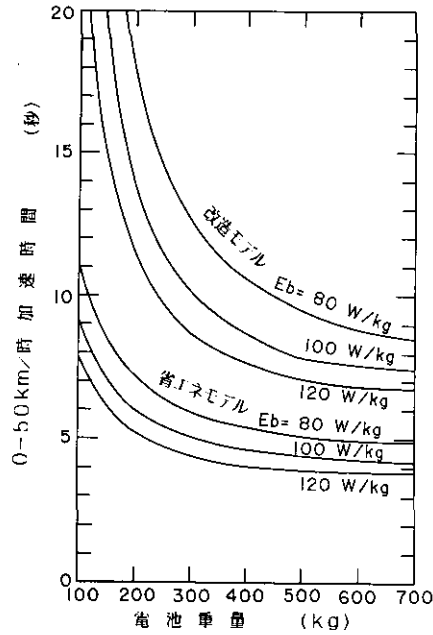


図4.16 電気乗用車の電池重量に対する加速性能 (0 → 50 km/h 加速時間)

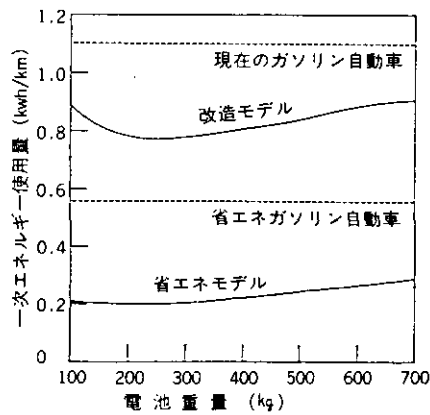


図4.17 電気乗用車の電池重量に対する一次エネルギー使用量

ユーザに車の選択の際に与える大きな要因は、走行費用であるので、この計算も示す。ここでも4モード走行を仮定し、また、計算に必要なパラメータとして電池単価480円/kg、電池寿命600回、電気料金20円/kWh、ガソリン代150円/lとした²¹⁾。図4.18に結果を示す。電気自動車では走行費用として電力料金と電池償却費の双方を必要とするが、現在のガソリン乗用車が1km当たり約15円かかるのに対して、省エネモデルではわずか2円程度である。これは電気自動車では一次エネルギー消費量の少なさが電力料金にそのまま反映し、省エネの効果は、電池償却費をも直接に低下させていることによる。

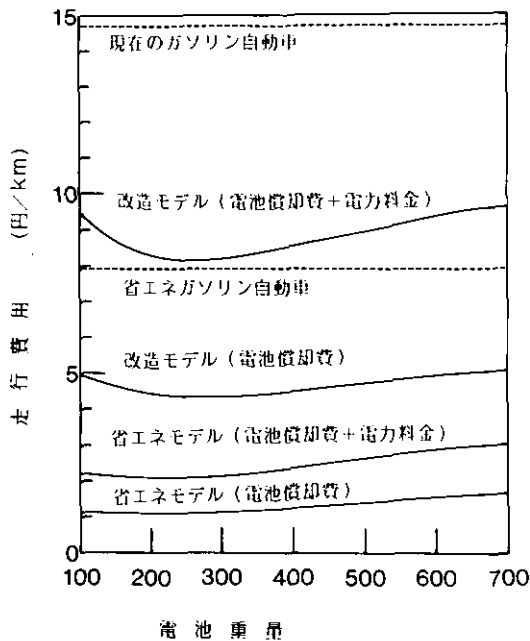


図4.18 電気乗用車の電池重量に対する走行費用

4.4.2 大型トラック

現在の日本の道路交通法では、車両総重量は20t以下と定められている。ディーゼルトラックではこの条件の下で車を作ると、最大積載量は約11tとなる。したがって、大型トラックと言えば11t積みトラックを指すことが多い。なお、道路交通法では、このクラスのトラックはすべて普通トラックと呼ばれているがここでは、一般の認識に近い大型トラックということばを使うこととする。

ここでは、トラックも乗用車と同様に電動化した場合、どの程度の性能が得られるかを検討する。ただし、検討の際使用する各種パラメータの値は、特別のことわりのない限り乗用車の値から類推した値である。まず、モデルとして取り上げる、ディーゼルエンジン型11tトラックの仕様と、各部分の重量を表4.18に示す²²⁾。ここで取り上げたトラックは前2輪、後1輪タイプ

表 4.18 11t 積大型ディーゼルエンジントラックの仕様と各部分の重量

パラメータ	仕様
全長	11,360mm
全幅	2,490mm
全高	3,195mm
ホイールベース	7,550mm
最大積載量	11,000kg
総排気量	11,149cc
最大出力	300ps
最大トルク	110kg・m
エンジン関係重量	1,433kg
伝達系重量	471kg
サスペンション重量	533kg
アクスル(含デフ)重量	1,281kg
タイヤ重量	740kg
ブレーキ・ステアリング重量	131kg
フレーム重量	750kg
キャビン重量	570kg
電装品・パイプ類重量	225kg
荷台重量	1,500kg
車両総重量	18,634kg

で、排気量 11,149 cc、最高出力 300 ps、最大トルク 110 kg・m の性能を有する。荷台の形状はバンタイプで、材質は鉄とするとその重量は 1.5 t、アルミとすると、1 t である。車両総重量は約 19 t である。

このトラックを参考にして、改造モデルと、省エネモデルのトラックの重量及び性能を検討する。まず、改造モデルの場合、エンジン関係の重量のみが軽減され、その替わり、電動機、コントローラー及び電池の重量が加算される。電動機重量は出力 1 kW 当たり 3 kg として計算すると、最大出力 300 ps に相当する電動機の重量は 600 kg となる。コントローラーは 200 kg と仮定する。電装品関係では、セルモーター始動用の重量分 40 kg を含めず、80 kg とする。すると、電池を除いた車両総重量は 18.06 t となり、20 t から差し引いた電池の積載可能な重量は約 1.9 t となる。

省エネモデルでは、乗用車の項でも検討したように、電動機は車両の中に埋め込まれたダイレクトドライブ方式とし、電動機は 6 輪の車輛すべてに取り付けられているものとする。この場合、電動機の大きさは、乗用車に用いたものと比べて直径で 2 倍、幅が 1.5 倍、重量で 6 倍、すなわち、直径が 40 cm 重量が 60 kg であるとする。また、コントローラーは電動機 1 個当たり

20 kgとする。このようにグイレクトドライブの構成とすると、伝達系はもちろんのこと、アクスル(車軸)も不要となる。また、フレーム重量は鉄の部分をアルミに替えることにより、乗用車の場合と同様の重量軽減が可能であるとすると、750 kgあったフレーム重量は省エネモデルでは529 kgとなる。その他の部分の重量は改造型モデルと同一とする。すると、電池重量を除いた総重量は15 t弱となり、電池のために残された重量は5 tとなる。改造モデルと省エネモデルの電動トラックの重量の内わけを表4.19に示す。

表4.19 電動トラックの各部分の重量

部 位	改 造 モ デ ル	省 エ ネ モ デ ル
フレーム	750	529
キャビン	570	570
サスペンション	533	533
タイヤ	740	740
ステアリング	63	63
ブレーキ	68	68
電装品	80	80
電動機	660	240
コントローラー	200	120
プロペラシャフト	100	0
クラッチ	53	0
トランスミッション	308	0
アクスル(含デフ)	1,281	0
カーゴ	1,500	1,000
その他	50	50
空車重量(除電池)	6,956	3,993

(単位：kg)

その他の特性については、まず、空気抵抗係数は、改造モデルを1.0、省エネモデルを0.32とする。0.32の値は、昭和60年の東京モーターショーに出品されたトラックにおける最小値である。前面投影面積は両車種とも6 m²とする。タイヤの転がり摩擦係数は改造モデルでは0.007に対して、省エネモデルでは0.0025とした。省エネモデルの0.0035の値はまだ実証されていない値であるが、乗用車用のタイヤに比べてトラック用は大口径でしかも幅が広いこと、及び空気圧が7~8気圧と高いことの3点により、この値の実証が可能であるとの判断ができる。

モーターの特性は、改造モデルでは効率が加速時の70%、定速走行時80%とした。省エネモデルでは、乗用車の場合と同様の磁石を使い、直径が2倍、幅が1.5倍になったことにより、磁石の体積が3倍に増え、しかも、巻線の数を50ターン、巻線の太さが12 mm²になるものと仮

定した。この条件では、モーター定数は 85, 抵抗は 0.14Ω となる。

改造モデルでは、ギアの比と、慣性モーメントの値が必要となるが、それらの値は表 4.20 に示す。省エネモデルではタイヤの慣性モーメントを総重量の 5% とした。

表 4.20 電動トラックの性能計算に用いるパラメータの値

パラメータ	改造モデル	省エネモデル
転がり摩擦係数	0.007	0.0035
空気抵抗係数	1.0	0.32
前面投影面積	6m ²	6m ²
電動機効率(加速時)	0.7	
(定常走行時)	0.8	
電動機定数		85
電動機巻線抵抗		0.14
伝達効率	0.9	1.0
回生効率	0.5	0.5
定員 [人]	2	2
空車重量(除電池)	6,956kg	3,993kg
慣性重量(総重量に対する割合)	0.7 (1ギヤ)	0.05
	0.54(2ギヤ)	
	0.2 (3ギヤ)	
	0.1 (4ギヤ)	
電池のエネルギー密度	48Wh/kg	48Wh/kg
電池のパワー密度	80W/kg	80W/kg

回生の効率は乗用車と同じく 50%, コントローラーの効率は改造型では 93%, 省エネ型では 95% とした。

電池は鉛電池を使用するものとして、そのエネルギー密度は 48 W/kg, パワー密度は放電初期 120 W/kg, 中期 100 W/kg 最終状態で 80 W/kg とした。以上のパラメータの値も表 4.20 に示す。

表 4.20 の値をプログラムに代入して行った省エネモデルについての計算の結果を図 4.19 に示す。図 4.19 は総重量を 20 t とし、電池重量と、荷重と車体重量の和が 20 t になるように設定したときの電池重量に対するレンジを示している。同図では 4 モード, 10 モード, 80 km/時定速走行, 40 km/時定速走行の 4 種類の走行モードの計算結果を示している。同図において、電池重量 5 t, すなわち、荷重 11 t の場合、4 モード走行では、330 km, 10 モードでも 250 km の走行が可能である。80 km/時定常走行では 650 km 走行可能で、この値は、東京から大阪まで充電なしに走行できる距離である。

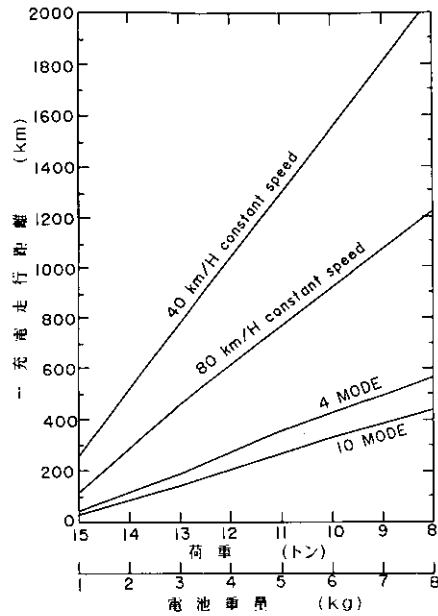


図 4.19 省エネ型電動トラックの総重量を 20t とした時の電池重量に対するレンジ（一充電走行距離）

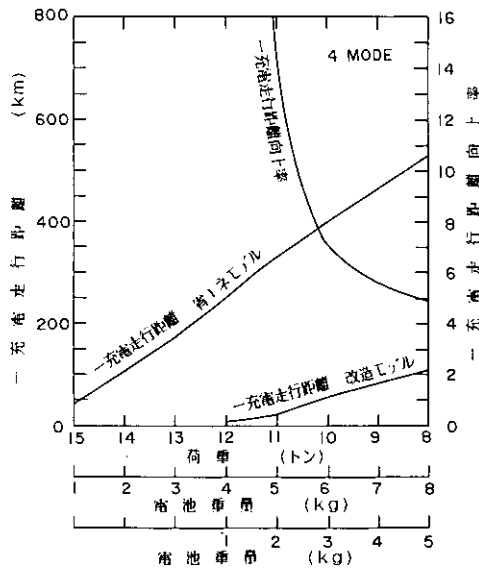


図 4.20 省エネ型と改造型の電気トラックの 4 モード走行における電池重量に対するレンジ（一充電走行距離）

次に、4モード走行について、省エネモデルと、改造モデルについての比較を図4.11と同様の型式で行った結果を図4.20に示す。同図で、改造モデルにおいて、電池重量を2tとする時、レンジはわずか23kmに過ぎない。これは、省エネモデルにおいて電池重量を5tとした時の14分の1である。この差は、電池重量の差が2.5倍、省エネの効果は、5.6倍に由来するが、省エネの効果の大きさは、乗用車の場合とほぼ等しい。

省エネモデルトラックにおける、総合的な性能について、荷重12t、電池重量5tの条件で計算した結果を表4.21にまとめて示す。0~400m加速は電池のパワー密度が80W/kgの場合で22.9秒であるが、この値は一般の市街地走行においても問題とはならない。最高速度は電池のパワー密度からは206km/hとなる。しかし、この速度を得るには式(4.15)より、印加電圧を300Vとしなければならない。この電圧を作り出すことは技術的には容易であるが、安全性の問題を生ずる恐れがある。300V以下の印加電圧では最高速度は印加電圧に比例する。

表4.21 省エネ型トラックの性能の計算結果

電池重量(t)	5
一充電走行距離(レンジ)(km)	
4モード	332
10モード	250
40km/h定速	989
80km/h定速	648
最高速度(km/h)	230(満充電) 217(中間状態) 200(完放電)
加速性能(秒)	
0→50km/h	4.5(満充電) 5.2(中間状態) 6.3(完放電)
0→400m	20.1(満充電) 21.3(中間状態) 22.9(完放電)
走行費用(円/km)	30

4モード走行時の消費率は1km当たり1650kJであり、これを、原油を発電用燃料とする場合の1次エネルギー使用率に換算すると、6600kJとなる。これはディーゼルエンジントラックの1次エネルギー使用率の22%である。電力料金と電池の原価償却費用の総和で維持費を表すと、4モード走行1km当たりで電力料金が17円、電池の原価償却費が13円の計30円程度である。ディーゼルトラックの燃料費は、軽油1lの価格が100円、燃料消費率が1.5km/lとす

ると、1 km 当たり 67 円となり、省エネモデルの電気トラックの約 2 倍である。トラックの寿命は約 100 万 km と言われており、この寿命内で維持費の差は 3700 万円にもなる。このことが、トラックを電気自動車に置き替える際の、ユーザにとっての最も大きなモチベーションになる。

4.5 まとめ

ここでは、この 10 年程の間に発達した技術の集積により、電気自動車はどの程度性能向上が図れるものかを理論的に検討した。ここで検討した新しい技術は、車体関係では、タイヤ、空気抵抗の小さなボディスタイル、軽量化したボディである。駆動関係では、電動機、駆動方式及び、コントローラー用の新しい半導体素子である。対象とする車種としては乗用車と大型トラックを取り上げ、新しい技術の導入により、どの程度性能が向上するかをシミュレーションプログラムを作成して計算した。

その結果、従来の電気自動車がエンジン自動車に比べて著しく劣ると言われていた、一充電走行距離(レンジ)、加速度、最高速度について、実用的に遜色のないレベルにまで向上させられるであろうとの結果を得た。また、一次エネルギー使用率、維持費に関しては、従来のエンジン自動車に比べて圧倒的に有利であるとの結果も得た。

新しい交通手段が社会に受け入れられるかどうかは投入したコストに対するパフォーマンスの大きさで決まる。その観点から考えると、新しい技術を投入して省エネ化を終わった電気自動車は、エンジン自動車に対して、十分に優位に立てるという計算結果が得られるわけである。このことから、もし、この計算結果を実施に移すに当たって大きな障害がなければ電気自動車が大量に普及する可能性は大いにあるということになる。

引用文献

- 1) 矢田恒二・清水健一・池谷忠司・二瓶光弥 (1979)：電気自動車の一充電当たりのパターン走行距離の推定。自動車技術会論文集，No. 19，30-37.
- 2) 樋口健治 (1980)：自動車工学。朝倉書店。
- 3) 五嶋教夫 (1980)：タイヤ・ブレーキ。自動車工学全書，景山克三監修，山海堂。
- 4) 酒井秀男 (1982)：タイヤのころがり抵抗。自動車の燃費低減に関するシンポジウム資料，No. 5，27-38。東京。
- 5) 原田忠和 (1982)：低燃費タイヤについて。自動車の燃費低減に関するシンポジウム資料，No. 6，39-47。東京。
- 6) 真下敏雄 (私信)
- 7) オートメカニック (1980)：燃費節約タイプスチールラジアルテスト。No. 7，139-145.
- 8) 室木 功・山本 紘・岩谷正人・横奥克日子 (1984)：低燃費コンセプトカーの開発。マツダ技報，No. 2，75-82.

- 9) 武藤真理 (1980): 自動車の空気抵抗係数 (C_d) 値の動向とその軽減法, 日本自動車研究所技術調査報告, 1号.
- 10) 山田 博 (1984): リラクタンス回転子モーターのトルク特性, 計測自動制御学会論文集, 20, 87-89.
- 11) 土手康彦・木下文武 (1985): ブラシレスサーボモーターの基礎と応用, 総合電子出版社.
- 12) 下田達也 (1985): 希土類磁石, 鉄と鋼, 71, 1269-1275.
- 13) 田附 修 (1971): 直流機, 東京電機大学出版局.
- 14) 工業技術院 (1977): 電気自動車の研究開発.
- 15) 大橋弘道 (1984): 電力用半導体素子の大電力化, 応用物語, 53, 137-146.
- 16) 多田隅進・大橋弘道 (1985): インバーター技術の現状と将来, 電気学会誌, 105, 533-542.
- 17) 矢田恒二 (1981): モーター・コントローラーの問題点と将来展望, 国際電気自動車フォーラム 81 資料集 1-10 (東京).
- 18) 資源エネルギー庁編 (1980): 電力需給の概要.
- 19) 矢田恒二・清水健一・池谷忠司・二瓶光弥 (1979): 電気自動車の加速時エネルギー効率, 自動車技術会論文集, No. 19, 38-44.
- 20) 電気自動車協議会 (1977): 電気自動車普及基本計画.
- 21) 日本電動車輦協会 (1982): 電気自動車普及マニュアルの作成調査報告書.
- 22) 三菱自動車 (1985): ふそう大型トラックカタログ.

5 電気自動車の普及のために残された問題点とその解決法

省エネモデルを採用することにより電気自動車が所期の目標通りの性能を得たと仮定した場合、大量の普及にはまだいくつかの問題点が指摘される。ここではそれらを列挙すると共に検討を加える。

5.1 冷暖房

蓄えられるエネルギーの少ない電気自動車冷暖房を行うには、石油ヒーターや冷房用のエンジンを取り付けるなど、エネルギー源を電力以外に頼らざるを得ないと考えられている。しかし、ここでも省エネの考えを導入すれば、使用エネルギーを大幅に減らすことができ、電力をエネルギー源とすることは可能である。冷暖房で省エネを行うということは十分に断熱をすることである。実際には、天井、床、壁面に断熱材を張り、前、後面の窓を二重とし、側面窓は厚めにするというような対策がとれる。

大まかな計算をしたい。4人乗り乗用車を仮定し、断熱は3 cm厚のガラスウールとし、二重窓のすき間を5 cm、側面は3 mm厚のガラスと、7 mm厚のプラスチックを重ねたものとする。天井、床、側壁の面積の和を10 m²、側面窓の面積を2 m²、前後面窓も2 m²とし、外気との間に10°Cの温度差を得る場合、熱の出入りは約560 Wとなる。また、乗客1人が100 Wの熱を吐出しているものとする。暖房の場合、乗客が1人とすると、460 Wの熱を供給する必要がある。冷房では乗客4人とすると、960 Wの熱を放出しなければならない。現在市販のヒートポンプ方式エアコンは1 Wの電力で約3 Wの熱の出し入れが可能であるから、冷房の場合でも320 Wの電力で十分効果がある。省エネモデルの電気自動車が4モード走行する時の平均のエネルギー消費は約4.5 kWである。したがって、走行に必要なエネルギーの7%以下でエアコンが可能となる。

このように、断熱を施すことにより、冷暖房エネルギーを節約する場合の技術的問題点は窓をいかに二重にするか（特に、前面窓）である。これまでの車では窓を二重にするという技術は使われていなかったために、窓を二重にすることは新たな技術開発要素となる。しかし、それによる重量の増加や、コストの上昇は無視できる程であると考えられる。

5.2 発電所での発電容量

すべての車が電気自動車に替わった場合、発電所の発電容量を大幅に上回ることになるのではないかと懸念がある。

昭和53年度現在、車により使われた原油の量は年間4,410 k lであった¹⁾。もし、エンジン自動車のすべてが電気自動車に替わったとすると、必要な発電量は約380億 kWhとなる。昭和53年度の全国の発電実績の統計は4,900億 kWhであるから、約8%の電力需要増となる。

ここで、最も電力需要の多い夏場の1日の使用状況を図5.1に示す²⁾。同図によると、14時から15時にピークがあるが、1日の電力使用量の平均値は、ピーク時の約73%である。発電設備の能力は需要のピークを上回るように建設されているので、ピーク値から73%を引いた残りの27%の電力を現在の発電能力そのままで供給することが可能である。電気自動車への充電は夜間が多くなるので、時間的に発電のピーク時とは一致せず、発電の余裕分の27%のほとんどが電気自動車の充電に使うことができる。

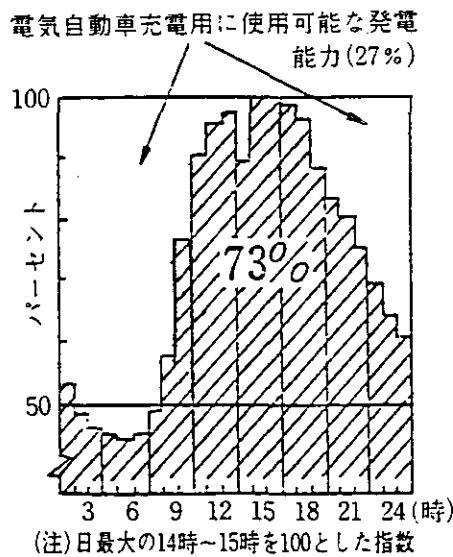


図5.1 関東地方の夏場の1日の電力使用状況

5.3 充電法

これまでの電気自動車の充電は、その車の車庫に備えられている充電器で行うという方法がとられていた。このような方法では、屋根付きの車庫をもっている人しか電気自動車を使うことができないし、長距離走行した先で充電を行うことも不可能となる。これを補うためには以下の充電法が考えられる。

1) 充電スタンドを設ける：これまでのガソリンスタンドのように充電を行うスタンドを設けるもので、ここで急速充電を行うか、充電された電池を交換するかのいずれかの方法がとれる。鉛電池を使う場合には、急速充電を30分行くと、8割程度の充電が可能である。また、電池交換方式では、電池スタンドからレンタルの形で借りる方法をとればユーザの負担にはならない。

2) 駐車場に充電設備を設ける：一時的に車を駐車する駐車場にパーキングメーターと同じようなタイマーと電源ケーブルを設置して置き、コイン投入によって料金を払い充電を行うものである。この方法では、既設の駐車場にわずかの設備を加えるだけで済む。

3) 走行中に給電を受ける：トロリーバスがこの方式で給電を受けながら走っているが電気自動車にも同じような方式を応用するものである。給電方式としては架線によるもの、側壁からのもの、道路に埋設したレールからのもの等が考えられる。また、非接触により給電しようという試みもなされている。これは、最近商品として出回り出した電磁調理器と同じように渦電流を利用するものである。この方式は他の交通の妨害にならないので、実用化されれば普及が容易である。

4) ハイブリッド方式とするもの：これまでの電気自動車の研究と併行して電動機と、エンジンの双方を動力源として使用するハイブリッド方式も研究されてきた。これは、電気自動車の電池の能力不足をエンジンで補うことを目的としている。これには二つの形式があって、一方は、エンジンでは発電のみを行い、電動機に電力を供給するもの、もう一方は、ドライブシャフトに電動機とエンジンが接続され、双方から走行エネルギーを供給するものである。前者は構造が簡単であるが効率が多少悪く、もっぱら後者が研究としては取り上げられてきた。ここでは、前者の方式を長距離走行に限って使用することを考えたい。すなわち、省エネモデルでは4モード走行でレンジを300 km程度得ることが可能であるが、年に数度あるかないかの長距離ドライブの際にだけ、エンジン式の発電機を併用することを考える。このような方式とすれば、日常の用途には純粋の電気自動車としての使用が可能で、長距離ドライブに限って、例えば発電機のみをレンタルの形式で借用して使用することが可能である。省エネモデルで、100 km/h の速度で高速道路を走る場合、400 kg の電池を積むものとする、電力消費率は約6.9 kWでレンジは277 kmとなる。これに発電機からも電力を供給した時の供給量と、レンジの関係を図5.2に示す。同図によると、東京・大阪間を走行するには3.5 kW出力の発電機を使用すれば間に合う。この出力の発電機の重量は約100 kgとなるので、実際に使用する際はミートレーラーに積載して牽引する方法をとれば良からう。全国に充電設備が整えば、この方式は必ずしも必要ではないが、それまでの一時期においては有効であろう。

5.4 電池材料の資源問題

大量に電気自動車が普及するとすれば、電池材料の資源問題も考えておく必要がある。表5.1に電池に使われる可能性のある鉱物資源の埋蔵量と、それらの年間生産量の世界統計を示す³⁾。鉛電池の場合、全重量の60%が鉛である。もし400 kgの重量の電池を積載すると仮定すると、すべての生産量を使っても1,700万台に供給できるのみである。したがって、資源の点からみると、電気自動車の普及の初期の段階では鉛電池に頼ることは可能であるが、遠い将来にわたって鉛電池のみを使い続けることは不可能である。

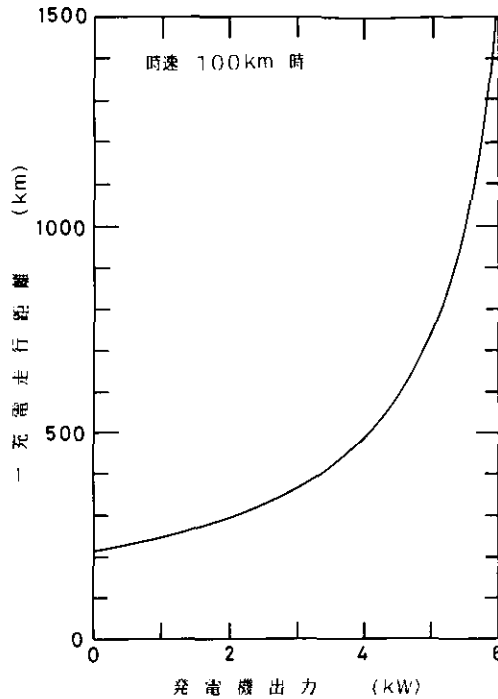


図 5.2 ハイブリッド用発電機を用いる場合の発電量と一充電走行可能距離（レンジ）の関係

表 5.1 電池に使われる資源の生産量と埋蔵量

	埋 蔵 量	年間生産量
鉛	1 億6,000万 t	411万 t
亜鉛	1 億7,500万 t	581万 t
ニッケル	6,000万 t	75万 t
鉄	453億 t	8 億7,500万 t
アルミニウム	170億 t	8,000万 t

ニアタム電池に属する Ni-Zn や Ni-Fe の電池でも資源問題に関しては大差がない。アドバンスト電池の Al-空気、Na-S などは全く問題がない。

このような観点からも、近い将来の需要は鉛電池でまかない、ニアタム電池で次の時代に対応し、最終的にはアドバンスト電池を用いる方向で電池の開発を進めるのが望ましい。

5.5 新たな公害問題

電気自動車の普及によって新たに起こり得る公害問題として、1) 発電量が多くなるための火力発電所近くでの窒素酸化物濃度の増加、2) 電池からの硫酸ミストの放出、3) スクラップとなった鉛電池による鉛公害、の三つがあげられる。

まず、1) であるが、5.2 より、すべての車が電気自動車に替われば、発電量は8%増加する。この増加分のほとんどは夜間電力でまかなうことができ、火力による発電量の増加量はこの8%よりもはるかに低い値となる。昭和53年度の環境白書によると、窒素酸化物の全排出量に占める火力発電所の割合は15%程度であり、たとえ8%の発電量の増加があっても、その寄与率の増加は1.2%程度である。これに対して、表2.5より、すべての車が電気自動車に替われば、少なくとも見積もっても窒素酸化物の濃度は40%減る。これらの増減を比較すると、火力発電所の影響によるNO_x濃度の増加は問題にならない。

次に、2) は、現在の鉛電池は開放型になっているため、硫酸ミストの放出があるが、これを受け止めるリザーバーを取り付ける研究や完全密閉型にする研究も進められており、問題に十分対応できる見込みである。

3) は、現在の鉛電池は使用後再生されずにスクラップとして埋立てなどに使われることが多いと聞くが、再生使用の技術もあり、鉛電池が大量に出回るようになれば、この技術が十分に生かされるものと考えられる。

5.6 まとめ

ここでは電気自動車の普及に当たって考慮しておくべき問題点を拾いあげて検討した。公害問題で言えば、電気自動車の大量普及に伴って、新たな問題の起こりうる可能性もあるが、それぞれに対応は可能な見込みである。また、他の問題点も、普及を阻止する程重大ではなく、その解決策も比較的容易に講ずることができる見込みである。

引用文献

- 1) 通産省(1978): エネルギー統計年報。
- 2) 東京電力(1980): 東京電力PR用パンフレット。
- 3) 通産省(1977): 鉱業便覧。

6 結 論

本報告書は、環境調和型技術の事例として電気自動車を取り上げ、その実現の可能性について検討した結果についてまとめたものである。

各章ごとの内容及び結果の要点をまとめると次のことが言える。まず、第2章では自動車公害の現状と電気自動車を導入したときの効果について述べた。現在、大気汚染と騒音問題に関しては、自動車によりもたらされるものの割合が非常に大きく、特に、厳しい規制にもかかわらず、年々その濃度が横ばい状態であるNO_xの主要な発生源が自動車である事をデータで示した。そして、もし、現在のエンジン自動車が電気自動車に置き替われば、環境改善が大幅に進む見込みであることを、シミュレーションによって示した。注目すべきは、大型トラックを電気自動車に置き替えることの効果の大きさである。

第3章では、電気自動車の現状についてまとめた。まず、電気自動車の研究、開発の動向に始まって、電気自動車の性能や普及の現状と問題点等について述べた。性能の現状については、一充電当たりの走行距離、加速性能及び最高速度のいわゆる動力性能が現在のエンジン自動車に比べて著しく劣っていること、このような技術的問題と、量産化が進んでいないために価格が高いことにより、電気自動車の普及が阻まれていること、技術的な問題を解決するには、高性能電池の開発が重要であると叫ばれているが、総合的な性能において鉛電池に優るものはまだないこと、このような現状のため、一時、活発に行われた電気自動車の研究・開発であったが、その速度は停滞しつつあり、年間の生産台数も減る傾向にあること等をデータをもとに示した。

このような現状の打開の可能性を検討したのが第4章である。ここでは、この10年程の間に開発され、使用可能になってきた、“タイヤ技術”、“空気抵抗低減技術”、“新素材技術”、“半導体技術”、“電動機の技術”それぞれについて、電気自動車の性能向上に役立つ技術を取り上げ、新しい電気自動車を作った場合の性能を評価した。その結果、乗用車、大型トラックともに、動力性能の面では実用的に遜色のないレベルにまで向上できる見込みが得られた。また、省エネルギー性、維持費に関しては現在のエンジン自動車に比べて、圧倒的に有利であるという結果も得られた。このように、新しい技術を集積した電気自動車は、環境改善に役立つばかりでなく、維持費が安いこと等の利点が付加されることにより、ユーザに受け入れられる可能性が十分にあることを示した。

第5章では、電気自動車が大量に普及するとした場合に、新たに生ずる可能性のある問題点を検討した。その中で、特に注目しなければならないのは新たな公害問題の発生の可能性であるが、現在の段階の検討結果では、その問題は避けられそうな見込みであることを述べた。

今後、ここでの検討の手法を踏まえて、他の環境調和型技術についても研究を進めることが重用である。また、ここで検討した電気自動車に関する結果の有効性を確かめることは、さらに意義が大きい。そのためには、実車を製作して、その性能が、理論的に検討したものどおり得られるかどうかを試験することが必要である。

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第1号 陸水域の富栄養化に関する総合研究—霞ヶ浦を対象域として—昭和51年度.(1977)
第2号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究—昭和51/52年度 研究報告.(1978)

(改称)

国立公害研究所研究報告

- ※第3号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae).(1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫、サナギ、幼虫の形態の比較)
第4号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—昭和52年度 中間報告.(1978)
第5号 芳香族炭化水素-窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究—昭和51、52年度 研究報告.(1978)
第6号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ)—霞ヶ浦を中心として—昭和53年度.(1979)
※第7号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae(Diptera).(1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫、サナギ、幼虫の形態学的研究)
※第8号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和52、53年度 研究報告.(1979)
第9号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—昭和53年度 中間報告.(1979)
第10号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究—昭和51~53年度 特別研究報告.(1979)
※第11号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity.(1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
第12号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation.(1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレームおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
第13号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
—第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係
—第2報 その一支流に見出された Chironominae亜科の20種について)
第14号 有機廃棄物、合成有機化合物、重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究—昭和53、54年度 特別研究報告.(1980)
※第15号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和54年度 特別研究報告.(1980)
第16号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測.(1980)
※第17号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果—臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究—昭和53、54年度 特別研究報告.(1980)
第18号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material.(1980)
(環境標準試料「リヨウブ」の調整、分析および保証値)
※第19号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅲ)—霞ヶ浦(西浦)の潮流—昭和53、54年度.(1981)
第20号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ)—霞ヶ浦流域の地形、気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響—昭和53、54年度.(1981)
第21号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅴ)—霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価—昭和53、54年度.(1981)
第22号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅵ)—霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量—昭和53、54年度.(1981)
第23号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅶ)—湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研

- 究—昭和53、54年度。(1981)
- 第24号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(VII)—富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関する研究—昭和53、54年度。(1981)
- 第25号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(VIII)—*Microcystis* (藍藻類)の増殖特性—昭和53、54年度。(1981)
- 第26号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X)—藻類培養試験法によるAGPの測定—昭和53、54年度。(1981)
- 第27号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(XI)—研究総括—昭和53、54年度。(1981)
- 第28号 複合大気汚染の植物影響に関する研究—昭和54、55年度 特別研究報告。(1981)
- 第29号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
—第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科Orthoclaadiinae 各種の記載と、その分布の下水汚染度との関係について
—第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載)
- ※第30号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究—昭和54、55年度 特別研究報告。(1982)
- 第31号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和55年度 特別研究報告。(1981)
- 第32号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)—昭和54年度 特別研究中間報告。(1982)
- 第33号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究—大気運動と大気拡散過程のシミュレーション—昭和55年度 特別研究報告。(1982)
- ※第34号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究—昭和55年度 特別研究報告。(1982)
- 第35号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究。(1982)
- ※第36号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究—昭和55、56年度 特別研究報告。(1982)
- ※第37号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究。(1982)
- 第38号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material.(1982)
(環境標準試料「池底質」の調整、分析及び保証値)
- ※第39号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究—昭和56年度 特別研究報告。(1982)
- 第40号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究—昭和56年度 特別研究報告。(1983)
- 第41号 土壌環境の計測と評価に関する統計学的研究。(1983)
- ※第42号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。(1983)
- ※第43号 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1983)
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with description of 15 new species.
Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
—第5報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する6月の調査成績とユスリカ亜科に属する15新種等の記録
—第6報 多摩本流より6月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について
—第7報 多摩本流より3月に採集されたユスリカ科の各種について)
- 第44号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究—環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究2)—昭和54年度 特別研究中間報告。(1983)
- 第45号 有機廃棄物、合成有機化合物、重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究—昭和53~55年度 特別研究報告。(1983)
- 第46号 有機廃棄物、合成有機化合物、重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究—昭和54、55年度 特別研究報告 第1分冊。(1983)
- 第47号 有機廃棄物、合成有機化合物、重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究

- 昭和54、55年度 特別研究報告 第2分冊。(1983)
- ※第48号 水質観測点の適正配置に関するシステム解析。(1983)
- 第49号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究—昭和57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第50号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(I)—霞ヶ浦の流入負荷量の算定と評価—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第51号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(II)—霞ヶ浦の物質循環とそれを支配する因子—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第52号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(III)—霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した富栄養化防止手法の研究—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第53号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(IV)—霞ヶ浦の魚類及び甲かく類現存量の季節変化と富栄養化—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第54号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(V)—霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第55号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(VI)—富栄養化防止対策—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第56号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(VII)—湯ノ湖における富栄養化とその防止対策—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- ※第57号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(VIII)—総括報告—昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第58号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究—昭和55~57年度 特別研究総合報告。(1984)
- 第59号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—光化学スモッグチャンバーによるオゾン生成機構の研究—大気中における有機化合物の光酸化反応機構の研究—昭和55~57年度 特別研究報告(第1分冊)。(1984)
- 第60号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—光化学エアロゾル生成機構の研究—昭和55~57年度 特別研究報告(第2分冊)。(1984)
- 第61号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)—昭和55~57年度 特別研究報告(第3分冊)。(1984)
- 第62号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究—昭和56~58年度 特別研究中間報告。(1984)
- 第63号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究—昭和56年度 特別研究報告。(1984)
- ※第64号 複合大気汚染の植物影響に関する研究—昭和54~56年度 特別研究総合報告。(1984)
- ※第65号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1.(1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響—第1分冊)
- ※第66号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2.(1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響—第2分冊)
- 第67号 環境中の有害物質による人の慢性影響に関する基礎的研究—昭和54~56年度 特別研究総合報告。(1984)
- ※第68号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究—昭和56~57年度 特別研究総合報告。(1984)
- ※第69号 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究。(1984)
- 第70号 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park.(1984)
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.
(日光国立公園の湖沼のユスリカに関する研究
—第1部 日光国立公園の湖沼のユスリカの生態学的研究
—第2部 日光国立公園の湖沼に生息するユスリカ類の分類学的、生態学的研究)
- ※第71号 リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析。(1984)
- 第72号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究2)—昭和55~57年度 特別研究報告(第4分冊)。(1985)

- ※第73号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—昭和55~57年度 特別研究総合報告.(1985)
- ※第74号 都市域及びその周辺の自然環境に係る環境指標の開発に関する研究。環境指標—その考え方と作成方法—昭和59年度 特別研究報告.(1984)
- 第75号 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa.(1985)
(琵琶湖底泥中の元素に関する陸水学及び環境化学的研究)
- 第76号 A study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere.(1985)
(大気中モノテルペンの挙動に関する研究)
- 第77号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究—昭和58年度 特別研究報告.(1985)
- 第78号 生活環境保全に果たす生活者の役割の解明.(1985)
- 第79号 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report in 1980-1982.(1985)
(環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究)
- 第80号 海域における赤潮発生のモデル化に関する研究—昭和57/58年度 特別研究報告.(1985)
- 第81号 環境影響評価制度の政策効果に関する研究—地方公共団体の制度運用を中心として.(1985)
- 第82号 植物の大気環境浄化機能に関する研究—昭和57~58年度 特別研究報告.(1985)
- 第83号 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan.(1985)
(日本の湖沼のユスリカの研究)
- 第84号 重金属環境汚染による健康影響評価手法の開発に関する研究—昭和57~59年度 特別研究総合報告.(1985)
- 第85号 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters.(1985)
(フリーラジカルの反応速度と分光学的及び熱力学的パラメーターに関する研究)
- 第86号 GC/MS スペクトルの検索システムに関する研究.(1986)
- 第87号 光化学二次汚染物質の分析とその細胞毒性に関する研究—昭和53~58年度 総合報告.(1986)
- 第88号 都市域及びその周辺の自然環境等に係る環境指標の開発に関する研究Ⅱ。環境指標—応用例とシステム—昭和59年度 特別研究報告.(1986)
- 第89号 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing.(1986)
(LANDSATリモートセンシングによる霞ヶ浦の水質計測)
- 第90号 ナショナルトラスト運動にみる自然保護にむけての住民意識と行動—知床国立公園内100平方メートル運動と天神崎市民地主運動への参加者の分析を中心として.(1986)
- 第91号 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions.(1986)
(人間による環境資源利用の経済分析—水環境と国立公園地域を対象にして)
- 第92号 アオコの増殖及び分解に関する研究.(1986)
- 第93号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(I)—昭和58~59年度 特別研究総合報告 第1分冊.(1986)
- 第94号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究(II)—昭和58~59年度 特別研究総合報告 第2分冊.(1986)
- 第95号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(I)—汚濁負荷の発生と流出・流達—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- ※第96号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(II)—水草帯・河口域・池沼の生態系構築と機能—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- 第97号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(III)—水路及び土壌による水質の浄化—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- 第98号 自然浄化機能による水質改善に関する総合研究(IV)—自然浄化機能を活用した処理技術の開発と応用—昭和58~59年度 特別研究報告.(1986)
- 第99号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究—昭和56~59年度 特別研究総合報告.(1986)
- 第100号 バックグラウンド地域における環境汚染物質の長期モニタリング手法の研究—特定汚染選択的検出法及び高感度分析技術の開発—昭和58~60年度 特別研究報告.(1986)

- 第101号 複合ガス状大気汚染物質の生体影響に関する実験的研究——昭和57 60年度 特別研究報告.(1986)
- 第102号 地球規模大気質変動に関する予備的研究.(1986)
- 第103号 環境調和型技術としての電気自動車の評価に関する基礎的研究.(1987)

※ 残部なし

Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1 * Man activity and aquatic environment—with special references to Lake Kasumigaura—Progress report in 1976.(1977)
- No. 2 * Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants—Progress report in 1976-1977.(1978)

(Starting with Report No.3, the new title for NIES Reports was changed to;)

Research report from the National Institute for Environmental Studies

- ※No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus*(Deptera, Chironomidae).(1978)
- No. 4 * Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1977.(1978)
- No. 5 * Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells—Research report in 1976-1977.(1978)
- No. 6 * Man activity and aquatic environment—with special references to Lake Kasumigaura—Progress report in 1977-1978.(1979)
- ※No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae(Deptera).(1979)
- ※No. 8 * Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1977-1978.(1979)
- No. 9 * Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1978.(1979)
- No. 10 * Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants—Progress report in 1976-1978.(1979)
- ※No. 11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity.(1980)
- No. 12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation.(1980)
- No. 13 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No. 14 * Studies on the effects of organic wastes on the soil ecosystem—Progress report in 1978-1979.(1980)
- ※No. 15 * Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1979.(1980)
- No. 16 * Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar.(1980)
- ※No. 17 * Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes—Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—Progress report in 1978-1979.(1980)
- No. 18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material.(1980)
- ※No. 19 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Lake current of Kasumigaura(Nishiura)—1978-1979.(1981)
- No. 20 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment—1978-1979.(1981)
- No. 21 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura—1978-1979.(1981)
- No. 22 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura—1978-1979.(1981)
- No. 23 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Applicability of trophic state indices for lakes—1978-1979.(1981)
- No. 24 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources—1978-1979.(1981)

- No. 25 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Mycrocystis*—1978-1979.(1981)
- No. 26 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Determination of argal growth potential by algal assay procedure—1978-1979.(1981)
- No. 27 * Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas—Summary of researches—1978-1979.(1981)
- No. 28 * Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Progress report in 1979-1980.(1981)
- No. 29 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthocladiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- ※No. 30 * Eutrophication and red tides in the coastal marine environment — Progress report in 1979-1980.(1982)
- No. 31 * Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1980.(1981)
- No. 32 * Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1979—Research on the photochemically secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1).(1982)
- No. 33 * Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region—Simulation of atmospheric motions and diffusion processes — Progress report in 1980.(1982)
- ※No. 34 * The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1980.(1982)
- No. 35 * Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic.(1982)
- ※No. 36 * Studies on the method for long term environmental monitoring—Progress report in 1980-1981.(1982)
- ※No. 37 * Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy — The Evaluation Laboratory of Man-Environment Systems.(1982)
- No. 38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material.(1982)
- ※No. 39 * The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1981.(1983)
- No. 40 * Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants—Research report in 1981.(1983)
- ※No. 41 * Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil—with special reference to heavy metals—.(1983)
- ※No. 42 * Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud transportation.(1983)
- ※No. 43 Studies on chironomid midges of the Tama River.(1983)
Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June, with description of 15 new species.
Part 6. Description of species of the subfamily Orthocladiinae recovered from the main stream in the June survey.
Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
- No. 44 * Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system—Progress report in 1979—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere(Part 2).(1983)
- No. 45 * Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—Outlines of special research project—1978-1980.(1983)
- No. 46 * Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—Research report in 1979-1980, Part 1.(1983)
- No. 47 * Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem—Research report in 1979-1980, Part 2.(1983)
- No. 48 * Study on optimal allocation of water quality monitoring points.(1983)

- No. 49 * The development and evaluation of remote measurement method for environmental pollution—Research report in 1982.(1984)
- ※No. 50 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Estimation of input loading of Lake Kasumigaura—1980-1982.(1984)
- ※No. 51 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—The function of the ecosystem and significance of sediment in nutrient cycle in Lake Kasumigaura—1980-1982.(1984)
- ※No. 52 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Enclosure experiments for restoration of highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura—1980-1982.(1984)
- No. 53 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Seasonal changes of the biomass of fishes and crustacia in Lake Kasumigaura—1980-1982.(1984)
- No. 54 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Modeling the eutrophication of Lake Kasumigaura—1980-1982.(1984)
- No. 55 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Measures for eutrophication control—1980-1982.(1984)
- No. 56 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Eutrophication in Lake Yunoko—1980-1982.(1984)
- ※No. 57 * Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters—Summary of researches—1980-1982.(1984)
- No. 58 * Studies on the method for long term environmental monitoring—Outlines of special research project in 1980-1982.(1984)
- No. 59 * Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Photochemical ozone formation studied by the evacuable smog chamber—Atmospheric photooxidation mechanisms of selected organic compounds—Research report in 1980-1982,Part 1.(1984)
- No. 60 * Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Formation mechanisms of photochemical aerosol—Research report in 1980-1982,Part 2.(1984)
- No. 61 * Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere(Part 1)—Research report in 1980-1982,Part 3.(1984)
- No. 62 * Effects of toxic substances on aquatic ecosystems—Progress report in 1980-1983.(1984)
- ※No. 63 * Eutrophication and red tides in the coastal marine environment—Progress report in 1981.(1984)
- ※No. 64 * Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Final report in 1979-1981.(1984)
- ※No. 65 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1.(1984)
- ※No. 66 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2.(1984)
- No. 67 * Studies on unfavourable effects on human body regarding to several toxic materials in the environment, using epidemiological and analytical techniques—Project research report in 1979-1981.(1984)
- ※No. 68 * Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil Research report in 1981-1983.(1984)
- ※No. 69 Fundamental studies on the eutrophication of Lake Chuzenji—Basic research report.(1984)
- No. 70 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.(1984)
- ※No. 71 * Analysis on distributions of remnant snowpack and snow patch vegetation by remote sensing.(1984)
- No. 72 * Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Research on the photochemical secondary pollutants formation

- mechanism in the environmental atmosphere—Research report in 1980-1982, Part 4.(1985)
- ※No. 73 * Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Final report in 1980-1982.(1985)
- ※No. 74 * A comprehensive study on the development of indices system for urban and suburban environmental quality—Environmental indices—Basic notion and formation.(1984)
- No. 75 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa.(1985)
- No. 76 A study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere.(1985)
- No. 77 * The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution—Research report in 1983.(1985)
- No. 78 * Study on residents' role in conserving the living environment.(1985)
- No. 79 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report in 1980-1982.(1985)
- No. 80 * Modeling of red tide blooms in the coastal sea—Research report in 1982-1983.(1985)
- No. 81 * A studies on effects of implementing environmental impact assessment procedure —With particular reference to implementation by local governments.(1985)
- No. 82 * Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants—Research report in 1982-1983.(1985)
- No. 83 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan.(1985)
- No. 84 * A comprehensive study on the development of assessment techniques for health effects due to environmental heavy metal exposure—Final report in 1982-1984.(1985)
- No. 85 Studies on the rate constants of free radical reactions and related spectroscopic and thermochemical parameters.(1985)
- No. 86 * A novel retrieval system for identifications of unknown mass spectra.(1986)
- No. 87 * Analysis of the photochemical secondary pollutants and their toxicity on cultured cells—Research report in 1978-1983.(1986)
- No. 88 * A comprehensive study on the development of indices systems for urban and suburban environmental quality II —Environmental indices—Applications and systems.(1986)
- No. 89 Measuring the water quality of Lake Kasumigaura by LANDSAT remote sensing.(1986)
- No. 90 * National trust movement in Japanese nature conservation—Trustworthy or illusion?(1986)
- No. 91 Economic analysis of man's utilization of environmental resources in aquatic environments and national park regions.(1986)
- No. 92 * Studies on the growth and decomposition of water-bloom of *Microcystis*.(1986)
- No. 93 * Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil(I)—Research report and papers(Part 1)in 1983-1984.(1986)
- No. 94 * Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil(II)—Research report and papers(Part 2)in 1983-1984.(1986)
- No. 95 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(I)—Drainage and flowing down of pollutant load—Research report in 1983-1984.(1986)
- ※No. 96 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(II)—Structure and function of the ecosystems of littoral zone—Research report in 1983-1984.(1986)
- No. 97 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(III)—Self-purification in stream and soil—Research report in 1983-1984.(1986)
- No. 98 * Comprehensive studies on effective use of natural ecosystems for water quality management(IV)—Development and application of wastewater treatment technologies utilizing self-purification ability—Research report in 1983-1984.(1986)
- No. 99 * Effects of toxic substances on aquatic ecosystems—Final report in 1981-1984.(1986)

- No.100 * Studies on the methods for long-term monitoring of environmental pollutants in the background regions—Development of highly sensitive and selective analytical methods for measurement of pollutants in the background regions—Progress report in 1983-1985.(1986)
- No.101 * Experimental studies on the effects of gaseous air pollutants in combination on animals.(1986)
- No.102 * A review on studies of the global scale air quality perturbation.(1986)
- No.103 * Technological assessment of electric vehicle from the environmental protection viewpoint.(1987)

* in Japanese
✕ out of stock

編集委員会委員

委員長	村岡 浩爾	委員	鷺田 伸明
副委員長	溝口 次夫	"	陶野 郁雄
"	秋元 肇	"	三浦 卓
委員	阿部 重信	"	安藤 満
"	松本 幸雄	"	古川 昭雄
"	安岡 善文	"	高橋 弘
"	安部 喜也	" (幹事)	増田 啓子

(昭和61年9月17日受領)

(昭和61年10月31日受理)

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

No. 103

国立公害研究所研究報告 第103号
(R-103-'87)

昭和62年2月16日発行

発行 環境庁 国立公害研究所

〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 日青工業株式会社
東京都港区西新橋2-5-10

Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
February 1987