

燃料電池自動車の研究開発動向

環境研究領域 紙屋 雄史 小高 松男 成澤 和幸 林田 守正 室岡 絢司
元環境研究領域 倉嶋 大輔

1. はじめに

近年、化石燃料枯渇の問題、ならびに各種動力源から生じる排気ガスによる地球温暖化や大気汚染など、いわゆるエネルギー環境問題が大きな話題となっており、各国の自動車メーカーに対しては、従来の内燃機関に代わるクリーンな動力源を搭載した車の開発が求められている。代替自動車の条件としては、燃料の製造から走行までのエネルギー消費と二酸化炭素排出量が少ないこと、燃料の持続的供給が可能で、さらに燃料供給施設が広く整備される可能性があること、などがあげられるが、これらの条件を満たす可能性のある種々の代替方式のうち、現在、最も注目されているものは燃料電池自動車である^{1)~3)}。本稿では、燃料電池自動車の研究開発動向について調査・分析した結果をまとめる。

2. 収集した燃料電池自動車の情報について

本調査研究では、燃料電池自動車の開発状況について、車両方式（乗用車もしくはバス）、開発地域（国内もしくは海外）ごとに分類して概観していく。開発車両数の年推移を図1に、収集した情報の一部を表1に示す。2002年末までの段階で集計を行い、得られた57の企業・研究開発機関における135車種の情報を分析した。燃料電池自動車の開発は、1996年頃から精力的に行われてきたものの、近年、新規開発車両数は横ばいとなってきている。これは、自動車メーカーが公言していた実用化の時期を迎えるにあたって、検討段階が研究開発から実証試験に移行したことが理由と思われる。次章において、これらの収集データを詳細に分析する。

3. 開発車の動力システム分析

本章では、調査によって得られた燃料電池自動車

の情報を分析した結果をまとめる。

3.1. 燃料の貯蔵と供給の方法について

燃料電池自動車における燃料の貯蔵と供給の方法としては、水素直接貯蔵方式、ならびに炭化水素系燃料改質方式の2種類が存在する。各方式の採用件数を図2および表2にまとめる。

乗用車方式の車両においては、高圧ボンベ貯蔵法が初期の研究において多く採用された。その後、燃料補給ならびに補給インフラの構築が容易で、さらに航続距離が稼げる点が特長と言える炭化水素系燃料改質方式の研究、具体的には、はじめにメタノール改質方式、それを追うようにガソリン改質方式が1997年以降盛んに行われた。ところが、現在は高圧ボンベ貯蔵法の採用が大多数である。これは、各自動車メーカーが公言していた実用化の時期を迎えるにあたって、実績のあるシステムが見直されたことが理由である。

バス方式の車両においては、ほとんど全ての開発車において高圧ボンベ貯蔵法が採用されている。これは、ボンベを搭載するための十分なスペースをルーフ部分などに確保可能である点や、運行上の特徴から燃料補給場所が特定できるため、水素供給スタンドを効率的に建設しやすいことが理由である。

次に、欧米の研究開発動向の特徴を日本のものと比べることとする。過渡期において、欧米は航続距離がガソリン車なみに実現できる超低温液体貯蔵法の研究が盛んであったのに対して、日本においては、高体積エネルギー密度に起因してコンパクト化が可能となる吸蔵物質貯蔵法の研究に関心が持たれていた点が大きな相違点と言えよう。しかし、前述したように、現在は、世界的に見ても高圧ボンベ貯蔵法以外の方式が採用された燃料電池自動車の開発は、ほとんど行われていない状況である。

3.2. 動力システム構成と運転方法について

燃料電池を自動車に搭載する際、これを単独で用いる方式と、バッテリーなどの補助電源デバイスと組み合わせるハイブリッド方式が考えられる。単独方式は、電源が1系統となるためシステムがシンプルになる。しかし、回生エネルギーの回収・再利用が不可能であり、負荷応答性に関しても問題を抱えてしまう。一方、ハイブリッド方式は、回生エネルギーの再利用が可能のため、高効率なシステムを構築できる点が特長と言える。また、自動車の始動時や、緊急時における電力供給が補助電源により可能となるため、安全性、信頼性の面で優れた方式となる。しかし、当然ながらシステムは複雑になる。

採用件数を図3および表2に示す。現状では、燃料電池単独方式とハイブリッド方式の開発数は同程度となっているが、欧米においては単独方式が多く採用されている。これは、システムがシンプルである点が理由と言うだけでなく、道路事情にも関連しているものと思われる。具体的には、機敏な動力応答性という点で若干問題のある単独方式ではあるが、都市内渋滞走行ではなく高速走行性能を重視する欧米では、この点が大きな問題とならないからである。一方、ハイブリッド方式における燃料電池と補助電源の容量比については、近年同比率型は減少し、逆に燃料電池主体型、燃料電池が補助的なレンジエクステンダ型の両者に明確に分類されるようになってきた。これは、開発する燃料電池自動車のコンセプト、具体的には燃料電池主体のマイルドなハイブリッドか、もしくは電気自動車の航続距離を伸ばすための補助的燃料電池システムか、が明確化してきたことが理由と考えられる。

3.3. 補助電源デバイスについて

燃料電池自動車においては、前節の分類のうちハイブリッド方式を採用した場合に補助電源デバイスが必要となる。各方式の採用件数を図4および表2にまとめる。

現状では、蓄電池の単独採用が大多数となっている。蓄電池においては、エネルギー密度、パワー密度などの特性は、鉛酸型<ニッケル水素型<リチウムイオン型の順で向上するわけであるが、現状ではニッケル水素型の採用件数が急激に伸びている。ウルトラキャパシタについては、ここ数年の技術の進歩と製作コストの削減により採用件数が急激に伸

び始めた。これが採用されるもう一つの理由として、蓄電池と比較して電圧変動が大きい点もあげられよう。この特性は燃料電池も同様であるため、併用して使用される際のデバイス間の相性が良好となり、本方式を採用すると、DC/DCコンバータなどを必要としないシステムを構築することができる。

3.4. 動力用モータ方式について

燃料電池自動車においても、電気自動車同様、様々な方式のモータが採用されている。各方式の採用件数を図5および表2にまとめる。直流モータと交流モータに大きく分類できるが、開発初期においては直流モータの採用が多数を占めたものの、現在では高効率・小型軽量化・高信頼性が実現できる交流モータの採用が主流となっている。ここで、交流モータのうち、日本では小型軽量化や効率面で有利な永久磁石同期モータが、それに対して海外では、低コスト、高信頼性、さらに制御方法によっては特に高速走行時(高回転時)に高効率が達成できる誘導モータが、ほぼ全ての開発車に採用されている点が注目される。これに関しても、前述した動力システム構成の選択理由と同様、国内外の道路事情も若干関連していると思われる。

自動車用モータ開発に関連する今後の研究課題としては、同期・リラクタンス力併用型モータの設計最適化、ならびに、電気鉄道と同様に、モータの応答性の良さを効果的・積極的に利用することを目的とした制御理論の構築⁴⁾などがあげられ、今後の成果が期待される。

4. 開発車の動力性能分析

本章では、自動車としての動力性能向上の様子について、特に車両効率、航続距離、最高速度、加速性能に着目し概観する。

はじめに、車両効率(tank to wheel)向上の様子を図6に示す。効率計測時の走行パターンや採用されている燃料貯蔵供給方式が同一ではないため、直接的な比較には注意を要するものの性能向上の様子が見てとれる。ここ数年の劇的な車両効率向上は、燃料電池本体の効率が電気化学反応論的にほぼ決定されるため大差ない事を考慮すると、補器類の損失低減や燃料電池・蓄電デバイス併用ハイブリッドシステムの性能向上などに起因するものと考えられる。しかしながら、燃料電池自動車は well to tank

効率をあまり稼ぐことが出来ないため、well to wheel 総合効率で他の自動車方式と比較して絶対的な優位に立つには、さらなる車両効率の向上が必要であると思われる。

航続距離については、最も影響を与えるであろう燃料貯蔵供給方法に着目して考察する。高圧ボンベ貯蔵法、液体水素貯蔵法、吸蔵合金貯蔵法、燃料改質法の5方式に分類してまとめた結果を図7に示す。乗用車タイプ車両においては、ボンベ貯蔵法を採用したものの長航続距離化が注目される。これは水素貯蔵の高圧化によるものであり、その結果、比較的航続距離を確保しやすい他の方式との性能差が縮まりつつある。また、図8に示すように、燃料貯蔵容器の容積についても、ボンベ方式において高圧化と同時に容量削減も同時に行われており、他の方式との差が縮まりつつある。高圧ボンベ方式以外が採用された車両については、長航続距離化や貯蔵容器容量削減の傾向は確認できず、当面は現状のレベルで問題ないと判断されたものと思われる。バスタイプ車両についても航続距離は現状維持となっており、理由は同様と思われる。

最高速度については、図9に示すように乗用車タイプ車両における高速化が確認できる。これは、主にモータ出力の大容量化によるものであり、内燃機関自動車のレベルに近づきつつある。バスタイプ車両は、航続距離と同様の理由で性能は現状維持となっている。

加速性能については、図10に示すように、すでに内燃機関自動車に匹敵する性能が得られている状況である。

5. まとめ

本稿では、燃料電池自動車の研究開発動向についての調査・分析を行った結果を報告した。得られた結論を以下にまとめる。

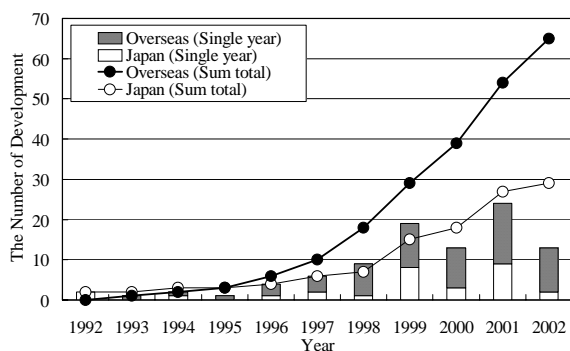
- (1) 現在、燃料電池自動車を取り巻く環境は、研究開発段階から実証試験段階に移りつつある。
- (2) 自動車搭載用としては、固体高分子形燃料電池に研究開発が集中しており、出力の重量密度・体積密度などの性能は、この10年で10倍程度向上している。
- (3) 現在は、高圧ボンベ貯蔵法以外の方式が採用された燃料電池自動車の開発は、ほとんど行われ

ていない。

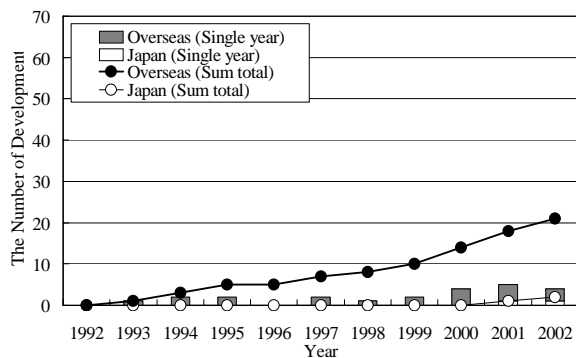
- (4) 現状では、燃料電池単独採用方式と蓄電デバイス併用ハイブリッド方式の開発車両数は同程度となっているが、欧米においては、単独方式が多く採用されている。
- (5) 補助電源デバイスとしては、ニッケル水素型蓄電池の採用が主流となっているが、近年、ウルトラキャパシタにも注目が集まりつつある。
- (6) 現在は、交流モータの採用が主流となっているが、日本では永久磁石型同期モータが、海外では誘導モータが、ほぼ全ての開発車に採用されている点が注目される。
- (7) 近年、燃料電池自動車の車両効率は確実に向上しているが、well to wheel 総合効率で他の自動車方式と比較して絶対的な優位に立つには、さらなる車両効率の向上が必要である。
- (8) 航続距離については、乗用車タイプ車両においてボンベ貯蔵法を採用したものの性能向上が注目される。これは、貯蔵の高圧化に起因するものであり、さらに、搭載ボンベ容量の削減も進んでいる。
- (9) 最高速度については、乗用車タイプ車両における高速化が確認でき内燃機関自動車のレベルに近づきつつある。加速性能については、すでに内燃機関自動車に匹敵する性能が得られている。

参考文献

- 1) 紙屋雄史:「海外における燃料電池自動車の研究開発と導入計画」,エンジンテクノロジー,山海堂, Vol. 5, No. 3, pp. 23- 29, 2003. 5.
- 2) 紙屋雄史:「実用化を待つ燃料電池電気自動車」,電気学会誌, Vol. 120, No. 3, pp. 165- 168, 2000.
- 3) D. Kurashima, K. Narusawa, M. Hayashida, Y. Kamiya, H. Roppongi, R. Saitou, K. Wakabayashi, M. Kataoka, 「A study on power systems of fuel cell vehicles -R&D trend survey and power system structural analysis-」, First circular of china-japan electric vehicle joint conference, Beijing institute of technology press, pp. 208- 214, 2001.
- 4) 堀洋一, 寺谷達夫, 正木良三:「自動車用モータ技術」, 日刊工業新聞社, 2003.







(a) 乗用車タイプ車両



(b) バスタイプ車両

図1 燃料電池自動車の開発車両数の推移（単年度および累計）

表1 燃料電池自動車の開発車両（2002年に開発されたものの一部を抜粋）

Company	GM	Ford	Daimler Chrysler	VW
Type, Name	Passenger car, HY-wire	Passenger car, Hybrid	Passenger car, F-Cell	Passenger car, HY.POWER
Pictures				
Auxiliary power unit	None			Ultracapacitor (50kW)
Type of motor	IM	IM	IM 65kW	IM 75kW





Company	NISSAN	HONDA	TOYOTA	
Type, Name	Passenger car, FCV	Passenger car, FCX	SUV, FCHV	Bus, FCHV-BUS 2
Pictures				
Auxiliary power unit	Li-Ion battery	Ultracapacitor	Ni-MH battery (21kW)	Ni-MH battery (21kW×2)
Type of motor	SM	PMSM 60kW	PMSM 80kW	PMSM 80kW×2

表2 種々の動力システム構成要素・方式の採用件数一覧

			Number of applicable FCVs in the world (JAPAN)	
			Passenger cars	Buses
Fuel Storage/ Supply Approaches	Based on hydrogen storage	Cylinder	48 (8)	16 (2)
		Absorbing alloy	9 (6)	0
		Liquid H ₂	9 (0)	3 (0)
	Based on reformed hydrocarbon fuel	Methanol	20 (9)	3 (0)
Gasoline		5 (1)	0	
Power System Configuration (FC : AUX Power Unit)	System based on FC only		(10 : 0)	21 (4)
	Hybrid system (FC and auxiliary power unit)	(9 : 1) ~ (6 : 4)	6 (4)	2 (0)
		(5 : 5)	6 (4)	0
		(4 : 6) ~ (1 : 9)	8 (1)	2 (0)
Without FC (EV)		(0 : 10)	-	-
Auxiliary Power Unit	Battery	Lead - Acid	10 (2)	3 (0)
		Ni - MH	17 (8)	4 (2)
		Li - Ion	6 (5)	0
	Ultra capacitor		7 (5)	0
Others (Flywheel, etc)		1 (1)	2 (0)	
Motors	DC Motor		10 (3)	2 (0)
	AC Induction Motor		21 (1)	6 (0)
	AC Synchronous Motor		24 (21)	3 (2)

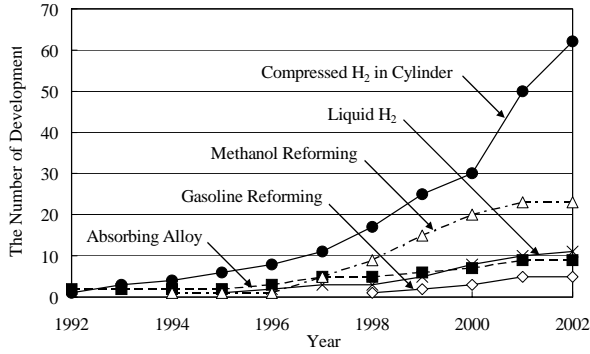


図2 各種燃料貯蔵・供給方式の採用件数推移

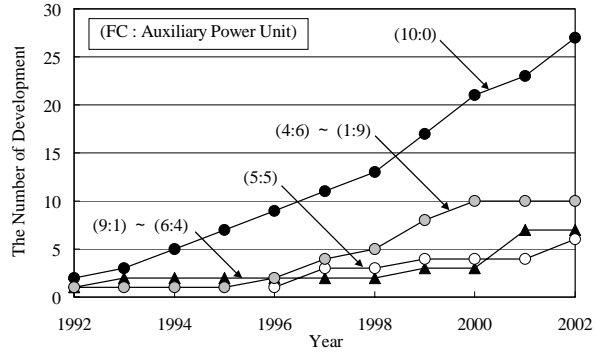


図3 FCと補助電源デバイスの出力比別採用件数推移

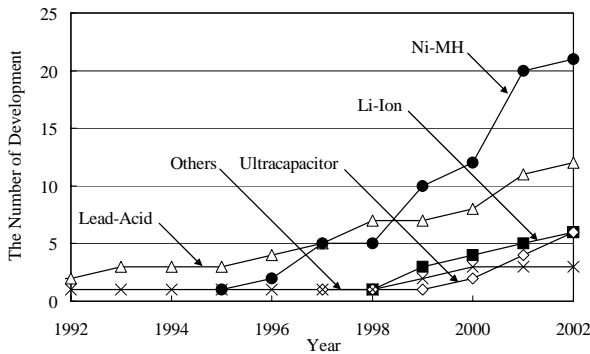


図4 各種補助電源デバイスの採用件数推移

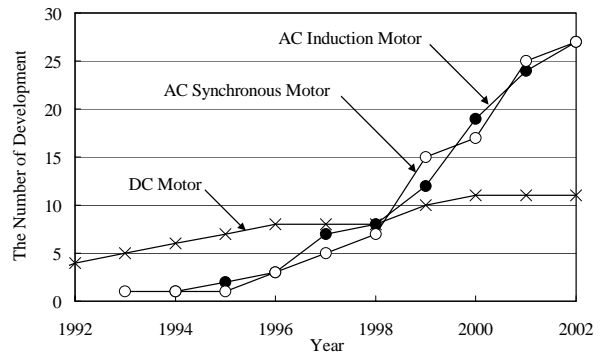


図5 各種モータの採用件数推移

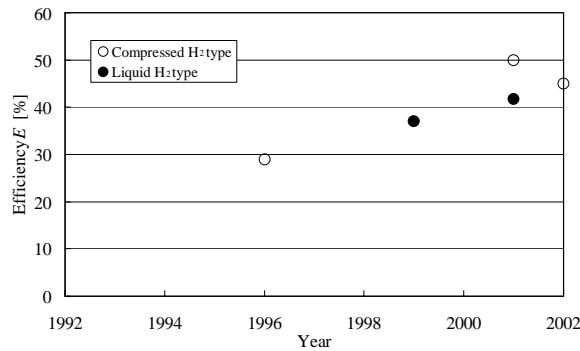
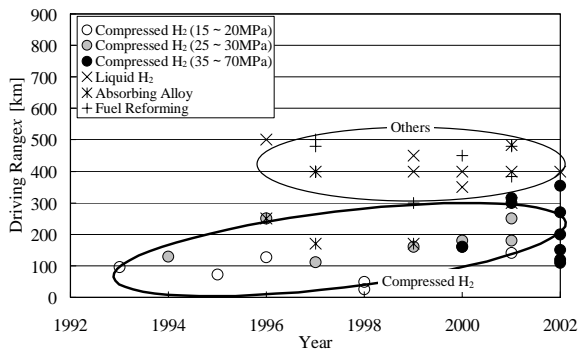
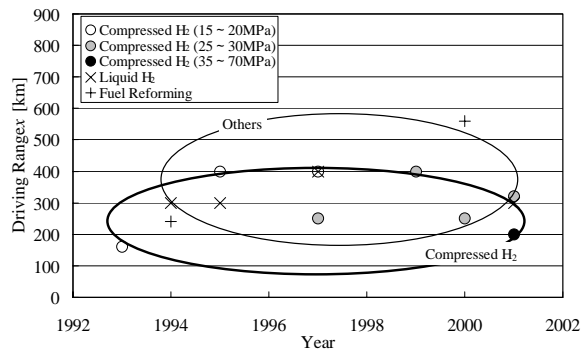


図6 開発車の車両効率 (Tank to Wheel 値)

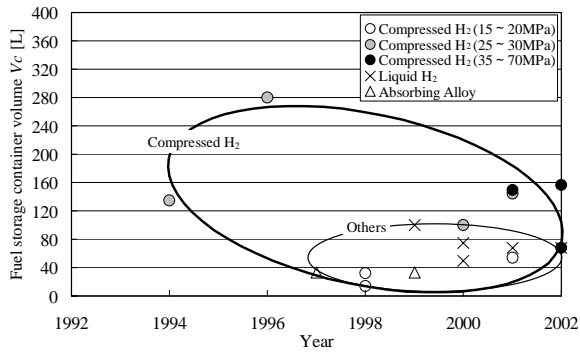


(a) 乗用車タイプ車両

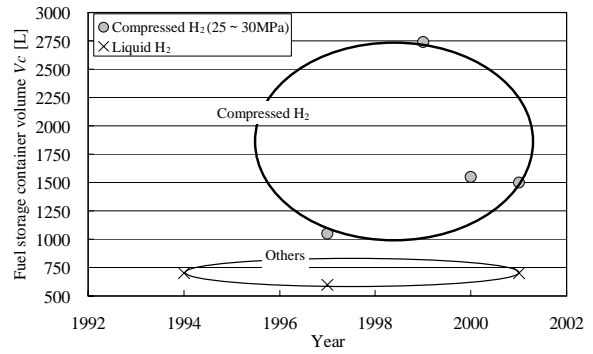


(b) バスタイプ車両

図7 開発車の航続距離

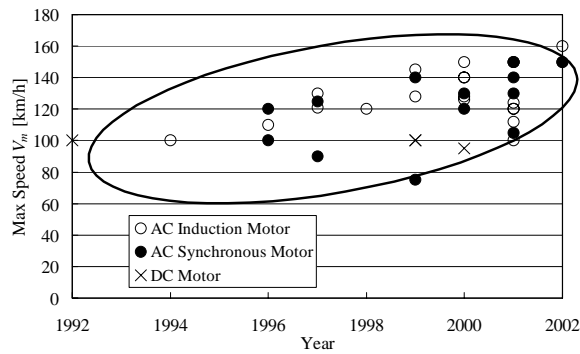


(a) 乗用車タイプ車両

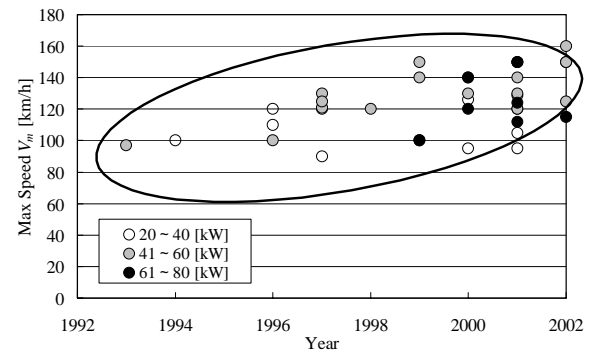


(b) バスタイプ車両

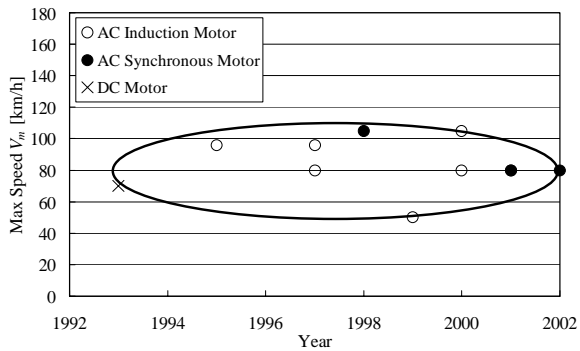
図8 開発車の燃料貯蔵容器容積



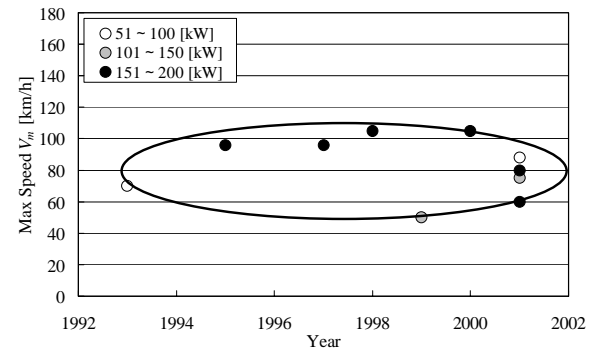
(a) 乗用車タイプ車両 (モータ種類で分類)



(b) 乗用車タイプ車両 (モータ出力で分類)

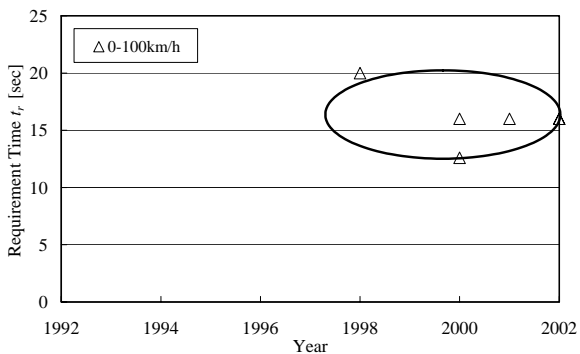


(c) バスタイプ車両 (モータ種類で分類)

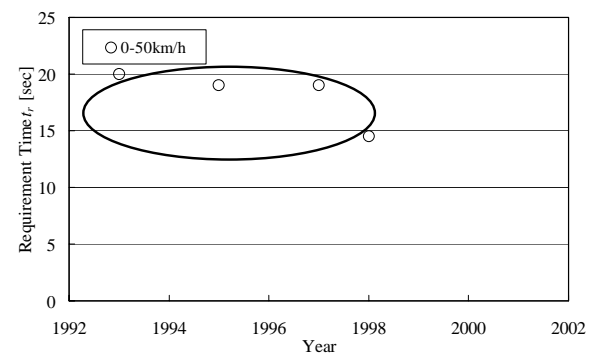


(d) バスタイプ車両 (モータ出力で分類)

図9 開発車の最高速度



(a) 乗用車タイプ車両



(b) バスタイプ車両

図10 開発車の加速性能