

最新ガソリンおよびディーゼル乗用車における 排出ガス挙動の比較解析

環境研究領域

鈴木 央一

1. はじめに

自動車保有台数の急激な増加により、環境問題が顕在化し、その結果、世界中で低排出ガス化、省エネルギー化が求められている。それをうけて個別車両に対する排出ガス規制強化が行われ、環境改善に向けた努力が各国で進められている。その結果、欧州では2002年に新車登録された乗用車のうち、40%を超す580万台がディーゼル車となった。それに対して、日本ではそれがわずか4千台で0.13%に止まっており¹⁾、目指すところは同じながら、その違いは大きい。

一般に、ディーゼル車は燃料消費率が優れている反面排出ガス（とくに窒素酸化物 - NOx と粒子状物質 - PM）性能に課題があるといわれ、一方ガソリン車は後処理装置により有害排出物の大半が浄化されるが、触媒の効かない冷始動時の排出ガスと燃費改善が課題といわれる。これらの課題に適應するため、ガソリン車では希薄燃焼を行い燃費率の改善を図る例がみられるのに対して、ディーゼル車において大量EGRや吸気絞りにより空気過剰率が減少する傾向がある。すなわち両者の境界が曖昧になりつつあるのが現状である。またディーゼル車においては従来後処理装置は装着されないものが多かったが、NOxとPM

の同時低減を行う高度な後処理装置を付けたものにおいては、ディーゼル2005年規制と同等以下の排出ガスレベルに到達しており²⁾、現状のガソリン車に遜色ないレベルといえる。そのように多くの点から両者の違いはなくなりつつあるといえるが、その現状を定量的に示した例は少ない。

そこでガソリンおよびディーゼル車について、現在排出ガス面でほぼ最高性能を有すると考えられるものを含む代表車種（乗用車クラス）の、排出ガスと燃料消費率について比較評価し、その要因解析を行った。その際のポイントとして、

- ・ NOx および PM の排出挙動について（ガソリン車のPMも含む）
 - ・ 燃料消費率について
 - ・ コールドスタート時の排出ガス挙動について
- の3点に注目することとした。

2. 供試車両および実験条件

2.1. 供試車両

供試車両としてはディーゼル車2台とガソリン車6台の計8台を用いた。いずれも乗用または小型貨物車扱いの小型車で、諸元を表1に示す。

表1 供試車両諸元

Vehicle	Registration Year	Regulation	Total mileage km	Engine type	Displacement L	Vehicle Weight kg	Aftertreatment
A	2002	Diesel '98	3000	DI Turbo Diesel	2.0	1400	Diesel Particulate-NOx Reduction system
B	2000	Diesel '98	49000	IDI Diesel	2.2	1090	None
C	2002	Gasoline '00	12000	DI Gasoline	3.0	1580	Three way Catalyst + NOx storage Catalyst
D	2003	Gasoline '00	500	DI Gasoline (idle stop)	3.0	1680	Three way Catalyst + NOx storage Catalyst
E1	2002	Gasoline '00	310	Gasoline - Electronic	1.5	1220	Three way Catalyst
E2			2710				
F	2004	Gasoline '00	250	Gasoline EFI	2.0	1350	Three way Catalyst
G	2002	Gasoline '00	32200	Gasoline EFI	1.3	990	Three way Catalyst
H	1994	Gasoline '78	6730	Gasoline EFI w/ Turbo	2.0	1390	Three way Catalyst

A 車は現在ほぼ最高レベルの排出ガス性能を有すると考えられるディーゼル車で、一部運転領域では NOx もすすもほとんど生成しない新燃焼を行うほか、NOx 吸蔵と DPF の両方の機能を有する後処理装置を装着している。B 車は副室式ディーゼル車で、EGR を行っているものの、後処理装置は有していない。C~H 車はガソリン車である。C 車、D 車は直噴ガソリン車で NOx 吸蔵触媒を有している。さらに D 車においては大型のジェネレータを持ち、アイドルストップを行っている。E 車はガソリン - 電気ハイブリッド車で、ガソリンエンジンについてはストイキ制御で、後処理には三元触媒を使用している。この車においては、バッテリーのエネルギー収支等も考慮した正規の測定と、それを省略した代わりに PM 測定を行った 2 通り実験を行った。それぞれ E1、E2 として識別する。F~H は通常のストイキ制御の三元触媒車で、車齢の新しいものから順番としている。D~G 車においては現行の 2000 年規制値をクリアした上で、さらに規制値の 50% () から 75% () 低減を達成した低排出ガス認定を受けているものである。

2.2. 試験条件

実験はすべて実車をシャシダイナモ上でモード走行することにより行っている。排出ガス計測には CVS バッグ法を用い、PM 計測には全量希釈トンネルを用いた。これら測定装置および各排出量および燃料消費率の計算法は原則的に技術基準に定める 10-15 モード試験法等によるが、PM 測定を行う際には、ガソリン車もディーゼル車の試験法で行っている。希釈トンネルは通常ディーゼル車用のものであることから、ガソリン車の一部では定量的な誤差がある可能性もある。また、バッグとは別途リアルタイム測定も行い、各ショートトリップ(発進から次の停止に到るまでの 1 つの走行部分)ごとの排出量を求め、コールドスタート時の解析に使用した。

試験走行モードとしては、現行規制モードであるホットスタートの 10-15 モード(以下、10-15 という)と、2008 年より型式指定で使用される CD34 モードにおいてコールドスタート(以下、CD34C)およびホットスタート(同 CD34H)で試験を行った。

試験時の燃料について、A 車では硫黄分 50ppm 以下、B 車では 500ppm 以下の軽油を用いた。ガソリン車については通常市販されているものを用い、試験車の設定によりレギュラーまたはハイオク仕様とした。

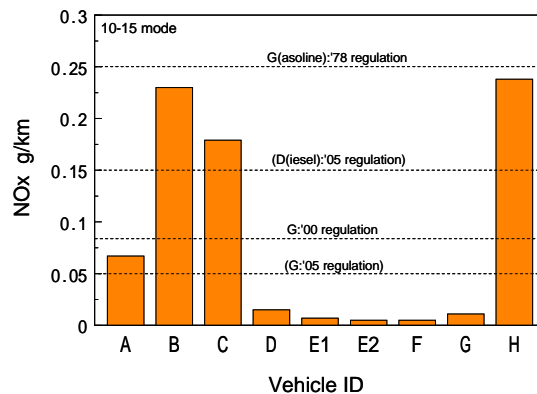


図1 10-15 モードにおける各車 NOx 排出量

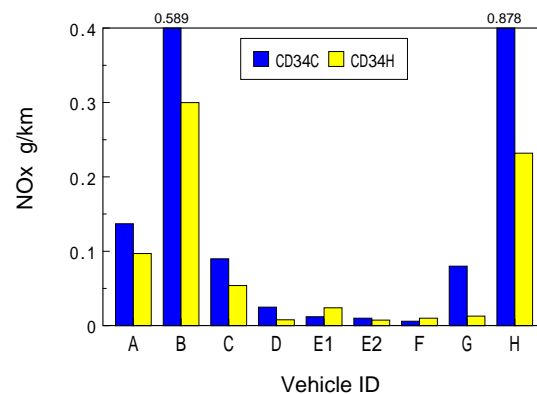


図2 CD34 モードにおける各車 NOx 排出量

3. 実験結果および考察

3.1. NOx および PM 排出挙動

各車で 10-15 を走行したときの NOx 排出量について、図 1 に示す。図中には各規制値も記入しているが、2005 年規制については測定法が異なるために単純に比較を行うことはできない。A 車はディーゼル車の 2005 年規制値を大きく下回るだけでなく、ガソリン車の 2000 年規制値をも下回る。このことから、最新レベルのディーゼル車では、現状のガソリン車より特に NOx 排出レベルが高いとはいえなくなっている。しかしながら、D~G の低排出ガス認定ガソリン車においては、2000 年規制値はもとより、2005 年規制値レベルをも大幅に下回っており、ガソリン車においても、さらなる低排出ガス化が図られていることがわかる。H 車はディーゼル車も含め、最も高い NOx 排出レベルを示した。図には示していないが、CO、THC 排出も最も多く、制定当時世界で抜きんでて厳しいといわれた 1978 年規制適合であっても、現在では並のディーゼル車と同等以下ということになる。

図 2 には、CD34C および CD34H における NOx 排出量を示した。CD34H については、排出量の減少した C 車を除くと 10-15 とほぼ同様の傾向になった。

コールドスタート時の解析については後述するが、E車、F車ではコールドスタート時でもホットスタート時とほぼ同等レベルにNOxを抑えるまでになっており、コールドスタート時に排出ガスが悪いといえないレベルに到達している。

図3には、10-15およびCD34CにおけるPM排出量を示す。測定対象としては、ディーゼル車、直噴ガソリン車に加えて、EFIストイキ制御の車の中から、ハイブリッド車であるE車と、NOx排出がきわめて低かったF車とした。A車のPM排出は2005年規制値の1/5以下となっており、新燃焼と高度な後処理装置により、従来のディーゼル車の水準を超えた低レベルの排出となっている。また、E車、F車においてもPM排出はきわめて低く、これら3車種については、PMを捕集したフィルタが測定前後で見た目に違いがわからないレベルであった。それに対して、直噴ガソリン車であるC車、D車はそれよりも明らかに高く、10-15およびCD34Cのいずれにおいてもディーゼル車の2005年規制値（ただし平均値規制値）と同等になった。ディーゼル車の規制が強化されて低いPM排出となってくると、低いとはいえないレベルである。なお、参考として、GVW20t重量車で2005年規制PM排出レベルのものを仮定し、その値を距離ベースに換算したものを破線で示した。これをみると、測定モードが異なるとはいえ、重量が10倍以上である大型車のPMが、現行ディーゼル乗用車を下回り、直噴ガソリン車に匹敵することがわかる。従来排出ガスとしてもっとも問題にされてきたのは大型車におけるPM排出といえるが、排出ガス改善が進み、大型車がもはや乗用車と大差ないところまで到達することを示しており、今後このレベルの大型車が普及してくると、自動車全体で排出されるPMにおける乗用車の比率がより大きくなっていくと考えられる。

ディーゼルエンジンでは一般に、NOxとPMが一方を減らそうとすると他方が増加してしまうトレードオフ関係にあるといわれる。そのため排出ガス性能を示すのにNOx-PMの関係を示したものが多く用いられる。今回実験を行った分についてNOx-PM関係を図4に示す。各プロットはNOx、PMそれぞれについて、10-15における排出量に0.75を乗じたものとCD34Cにおける排出量に0.25を乗じたものの和で、2008年より排出ガス評価に使われる計算法である。NOx、PMともに排出量の多いものと少ないものの差

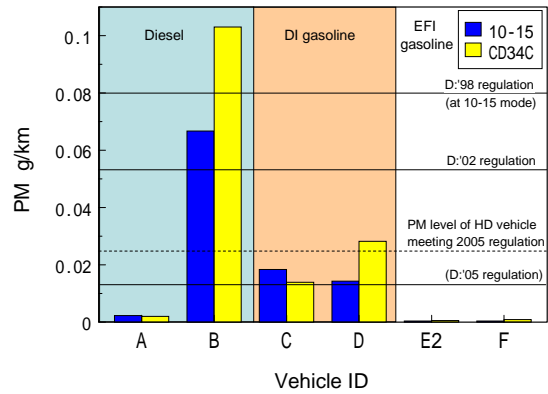


図3 各車におけるPM排出量

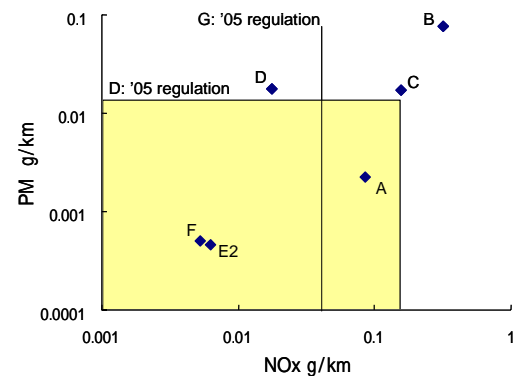


図4 各車におけるNOxとPM排出量の関係

が約100倍に及ぶため、指数で示した。プロットが少ないために明確な傾向とはいえないが、図では上記のようなトレードオフ関係を示していない。ガソリン車では未規制のPM排出に対してこれといった対策を行っていない一方で、NOx低減を後処理装置に多く依存している。そのためC車とD車のように、同種の車ではNOx排出の違いによりほぼ水平に移動すると考えられる。A車はディーゼル車としてはきわめて低い排出ガスレベルだが、ストイキ制御ガソリン車のレベルには至っていない。しかしながら、その差が大きいのはPMよりもむしろNOxである。ディーゼル車の排出ガスというまずにPMが連想されるが、今後ガソリン車レベルの排出ガスを目指すとした場合、さらにNOxをどう減らすかが課題となるだろう。

3.2. 燃料消費率について

ディーゼル車のメリットとして第一にあげられるのは、燃料消費率がよくCO2排出が少ないことである。その現状について、比較を行った。図5に、各車の測定燃料消費率を示す。しかし、単純な燃料消費率では、様々な要因が影響するためエンジンまたはパワーtrainの性能として比較することができない。そ

こでもっとも影響の大きいと予想される車両重量による補正を行うこととした。

車両重量による補正に際しては、ガソリン車における2010年の燃費目標基準³⁾を参考とした。同基準では車両重量のクラスにより燃費目標値が異なる。その関係に学術的な根拠はないが、現状の標準的車両の重量と燃料消費率の関係を表す一つの指標とみることができる。それより燃料消費率 F_c と車両重量 W の関係式：

$$F_c = 33.4 e^{-0.00069 W}$$

が得られる。そして各車の測定燃料消費率に、A車の車両重量における燃費目標値を当該車両の車両重量における燃費目標値で除した値をかけあわせることで、各車の燃費消費率をA車相当の燃料消費率とした。その結果を示したのが図6である。まず明らかに燃費で優れているのはハイブリッド車のE車である。ハイブリッド車ではバッテリーの状態が燃費に影響する。E1ではそれを正確に評価しているが、E2ではPM測定が主眼でそれを省略したために異なる測定燃費となった。この図より、飛躍的な燃費率の改善にはエンジン技術のみでは容易でなく、制動エネルギーの回収が大きなポイントになることがわかる。次に優れているのはA車で、ディーゼル車が通常のガソリン車よりも燃費がいいことを示す結果となった。ただし、モード試験中にはDPF再生等が行われていないため、中長期的な平均燃費だとこれよりやや低い値となる。B車もディーゼル車であるが、とくに燃費がいいとはいえない。とはいえ、2010年の燃費目標値に届いていることから一世代前のガソリン車よりは燃費が優れていたといえる。しかし、ガソリン車における燃費改善の技術進歩はめざましく、今回の測定でもD~G車はそのレベルに到達しており、今やディーゼルであることと燃費がいいことと等価ではなく、直噴ターボディーゼルであってはじめて優位になるといえる。ハイブリッド以外のガソリン車では、G車が燃費率で優れている。高度な低燃費技術が採用されていると予想されるが、一方で、この車は排気量、車両重量ともに最も小さいもので、同一モードを走行した場合、他車よりも全般にアクセル開度が大きくなり、より熱効率の高いエンジン運転領域が使われるため、燃費率的に優位になった可能性もある。

3.3. コールドスタート時の排出ガス挙動の違い

ガソリン車の排出ガス対策においては、触媒温度が

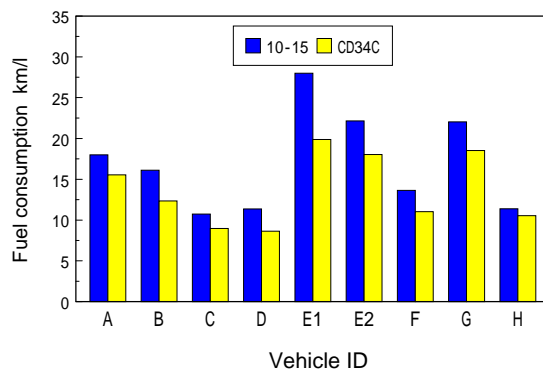


図5 各車の燃料消費率

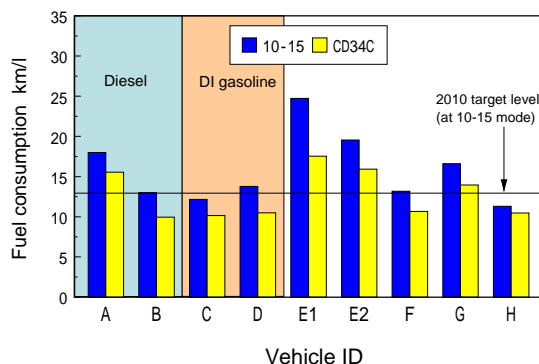


図6 各車の車両重量で補正した燃料消費率 (A車を基準)

低いコールドスタート時が大きなポイントとなる。現在型式指定時の排出ガス性能試験で、低排出ガス認定を行う際に、および認定車ではホットスタートの10-15モードよりもコールドスタートである11モードで基準値を満たせないため、より上のランクにならないケースが多い⁴⁾。一方、ディーゼル車においてはコールドスタート時の排出ガス増加傾向はガソリン車よりも小さいと予想されるが、A車では後処理装置を搭載することでNOx低減を行っており、ガソリン車に近づく可能性もある。そこで、CD34Cにおける第1ショートトリップ(以下、第1st)に注目して排出ガス解析を行うこととした。

図7は、CD34Cの第1stにおけるNOxおよびCO排出量と、そのモード全体に対する排出割合を示したものである。D~Gのガソリン車においては、モードトータルのNOxの40%程度以上をこの部分で排出しており、触媒の活性がコールドスタート直後のNOx排出に大きく影響することがわかる。なお、F車においてはこの部分でNOxの約80%を排出しているが、エンジンの制御としてはストイキ制御であることから、エンジンアウトのNOx量はH車と大差ない

レベルと仮定する。この場合、コールドスタート直後のショートトリップでありながら、90%を大きく上回る浄化率を示していることになり、極めて高いレベルのコールドスタート対策が行われているといえる。また、C車においては、この部分におけるNOxがそれ以上に低い値となった。ただし、その後やや高い排出が記録されたことから、NOx吸蔵触媒の特性によると考えられる。ディーゼル車ではあるが、同様にNOx吸蔵機能を有する後処理を持つA車においてもコールドスタート時に排出されるNOxの全体に対する割合は低いものとなっている。また、H車においても第1stにおけるNOx排出割合は低いが、この車の場合には、触媒活性化後の排出レベルが他の車よりも高いため、同列には扱えない。

上記のようなコールドスタート時のNOx排出傾向について異なる角度から検討するためにCOの排出傾向に着目することとした。図7でA車においては、モードトータルのCO排出がほぼゼロであったことから、排出割合を掲載していない。B車においても、CO排出はきわめて低く、ディーゼル車ではCOは後処理の有無によらず低い。第1stのNOx排出量が低いのはC車、E車、F車といえる。E車の場合、最も排出が予想される発進時を電気モーターで行うために、NOxだけでなく、COについても低い排出となっている。しかしながら、F車は2000年規制適合車ではCOの排出および全体に対する割合の両方が最も高い。C車では排出量がとくに多いといえないが、全体に対する割合では、G車とならび2位に位置する。これらのことから、CO排出とNOx排出がトレードオフ的な関係をもつ可能性がある。

図8はCD34CにおけるNOxとCOの排出量の関係について示している。この図を見ると、コールドスタートでは、COとNOxがトレードオフ関係にあることがわかる。とくに、NOx排出が少なく、2000年規制値より75%減の低排出ガス認定車（ ）であるE車、F車がCO排出では1位と2位になっている（ただし、欄外になったH車をのぞく）。このことは、環境面での深刻度の低いCOの排出を多少増やしてNOx低減を図っていることが考えられる。COの排出は主に空燃比がリッチになったときおよび燃焼温度が低いときに起こるが、そのような状況は燃焼でのNOx抑止にはむしろ有利である。また、リッチ雰囲気ではTHCも排出されるが、一部の触媒では比較

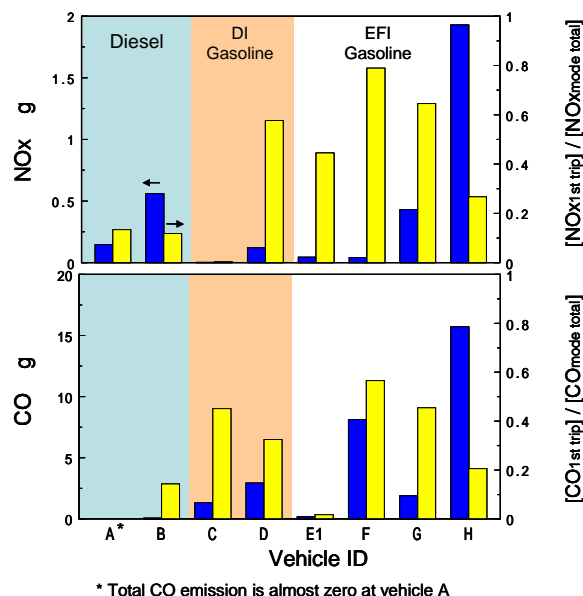


図7 CD34Cの第1stにおけるCOおよびNOx排出量とその全体に対する割合

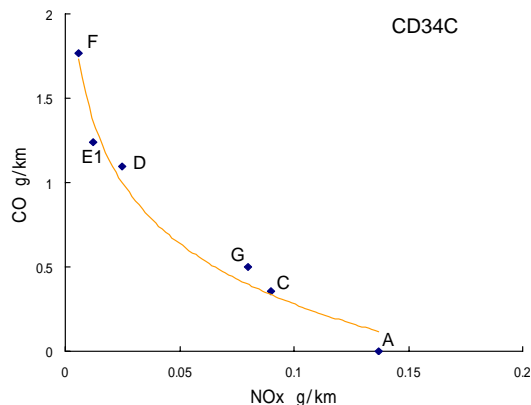


図8 CD34CにおけるNOxとCOのトレードオフ

的低温でTHCを吸着できるものもあり、THCの悪化なしにNOxのみの低減が可能となってきている。以上より、コールドスタート時のNOx低減を図ろうとするとCOが増加しやすいことになる。一方、これらの方策が実際に行われているとすると、燃費は悪化の傾向をもたらすことになる。A車は図に示した中ではNOxが最も高いが、トレードオフの傾向線上にあり、排出ガス低減技術的には同等のポテンシャルを有しているとみることができる。しかしながら、ディーゼル機関では排気ガス中に多量の酸素が存在する上にCO排出はきわめて低く、ストイキ制御ガソリン車と同じようなNOx低減方策はとれない。したがって、さらなるNOx低減を図るとなると、細かい制御性の向上のみでは困難で、新燃焼や触媒性能などで革新的技術が要求されることになると考えられる。

図9は CD34C における第1st と全体の燃費を CD34H に対する割合で示したものである。コールドスタート時に燃費の悪化の著しいものほど高い値になる。モードトータルでは、コールドスタートによる悪化幅は、A 車が 10%程度でやや低く、それ以外は 15~30%となった。それに対して、第1st における悪化幅の違いはさらに大きい。まず、H車においては、特別なコールドスタート対策(寒冷地でのチョーク等は除く)を行っていないと考えられ、このレベルの燃費悪化が暖機前のオイルの粘性の違い等によるものを表していると考えられる。次に、悪化幅の一番小さいのはA車となった。ディーゼルでは、燃料リッチにならないため、悪化要因がないことに加えて、A車では燃焼安定性確保の観点から、コールドスタート時には EGR 率や新燃焼を行う運転領域を変化させていることが予想される。それに対して、2000 年規制適合ガソリン車はいずれも 1.5 倍を超える大幅な燃費悪化がみられた。このことは、コールドスタート時には、多少燃費を犠牲にして排出ガス改善を図っていることを示唆しているといえる。ただし、CO の排出量と燃費の悪化率とは、とくに相関はみられない。第1st ではまだ再生エネルギーを使用できないハイブリッド車の E車に加えて、直噴ガソリン車である C車、D車においても、コールドスタート時には、ストイキ制御領域が増えて希薄燃焼領域が減少するなど、制御の抜本的な変化が影響したためである。なお、B車は後処理装置を全く有していないにもかかわらず、悪化幅が大きい。これは副室式ディーゼル機関の特性から、燃焼室表面積が大きく圧縮比が高いため、コールドスタート時はとくに熱損失が大きくなったためと考えられる。

4.まとめ

4.1.ディーゼル車について

高性能後処理装置を有するディーゼル車では、NOx 排出量がガソリン車の規制値レベルに到達しているが、低排出ガス認定ガソリン車のレベルには届かない。PM についても従来のものより飛躍的に低減しており、2005 年規制値を大幅に下回った。今後ガソリン車並の排出ガスを目指すには PM よりも NOx 低減が課題となる。燃費率については、直噴式ではガソリン車より優位といえるが、副室式ではもはや優位とはいえない。

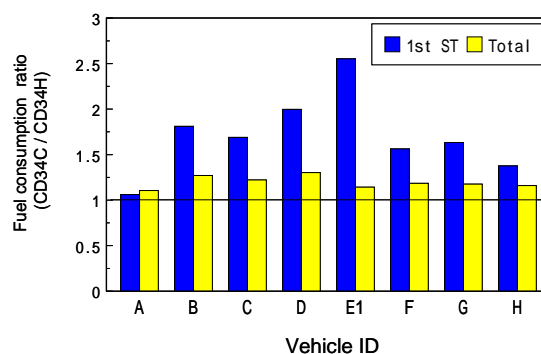


図9 第1st とモード全体の、CD34H に対する CD34C の燃料消費率の割合

4.2.ガソリン車について

低排出ガス認定の三元触媒ガソリン車では、NOx、PM ともきわめて低い。コールドスタート対策の進んだものでは、コールドスタート時でも NOx 増加がほとんどみられないレベルになっている。一方、直噴ガソリン車ではディーゼル 2005 年規制レベルの PM 排出がみられた。燃費率については、改善が進んでいるといえるが、コールドスタート時では排出ガス対策を優先することなどから、その幅は小さい。飛躍的な燃費改善にはハイブリッドが必要だろう。

以上より、光化学オキシダント生成抑止が重要である日本の現状では、NOx の低いガソリン車が向くといえるが、平均走行距離が短くコールドスタート状態が多いことは、ガソリン車での燃費改善が困難な環境でもある。

おわりに

本編を書くにあたり、実験実施に関して派遣職員小川恭弘氏に絶大な支援を受けたことを、この場を借りて感謝する次第である。

参考文献など

- 1) 矢野経済研究所プレス資料，2004 年 1 月 21 日付
- 2) 石井ほか，交通安全環境研究所平成 15 年度研究発表会講演概要集，p201-204
- 3) 国土交通省ホームページ：http://www.mlit.go.jp/jidosha/sesaku/environment/ondan/ondan.pdf
- 4) 鈴木延昌ほか，交通安全環境研究所平成 14 年度研究発表会講演概要集，p195-200